

冬季肉牛加热饮水围栏育肥模式适用性分析

贺腾飞^{1,2}, 刘天旭^{1,2}, 龙沈飞^{1,2}, 张校军^{1,2}, 刘芮兵^{1,2},
凌小凡², 刘继军^{1,2}, 陈昭辉^{1,2*}

(1. 中国农业大学动物营养学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 中国农业大学动物科技学院, 北京 100193)

摘要: 为研究冬季中国西北地区肉牛加热饮水条件下围栏育肥模式的适用性, 该研究实测了加热水围栏育肥 (平均饮水温度: $(20.58 \pm 0.91)^\circ\text{C}$) 和常温水舍内育肥 (平均饮水温度: $(7.20 \pm 1.70)^\circ\text{C}$) 2 种模式下的相关环境指标, 并计算环境温湿指数 (Temperature Humidity Index, THI)、风冷指数 (Wind Chill Index, WCI)、综合气候指数 (Comprehensive Climate Index, CCI) 和冷应激指数 (Cold Stress Index, CSI), 探究两种育肥模式对肉牛生长性能的影响。结果表明: 与常温水舍内育肥相比, 加热水围栏育肥的环境温度、湿度和有害气体浓度均显著降低 ($P < 0.05$), 风速显著升高 ($P < 0.05$)、THI、WCI 和 CCI 显著降低 ($P < 0.05$), CSI 显著升高 ($P < 0.05$)。此外, 加热水围栏育肥肉牛的平均日增质量为 $(1.40 \pm 0.39) \text{ kg/d}$, 显著高于常温水舍内育肥组的 $(1.14 \pm 0.47) \text{ kg/d}$ ($P < 0.05$), 加热水围栏育肥肉牛的日常采食质量与日增质量比为 8.83 ± 3.63 , 显著低于常温水舍内育肥组的 12.11 ± 6.34 ($P < 0.05$), 且建筑成本较常温水舍内育肥降低 37.78%。综上所述, 冬季采用加热水围栏育肥模式能够显著提高肉牛生长性能, 并节约建筑成本。

关键词: 温度; 环境调控; 肉牛; 围栏育肥; 舍内育肥; 饮水温度; 生长性能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.021

中图分类号: S823.9⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-03-0182-07

贺腾飞, 刘天旭, 龙沈飞, 等. 冬季肉牛加热饮水围栏育肥模式适用性分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 182-188.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.021 <http://www.tcsae.org>

He Tengfei, Liu Tianxu, Long Shenfei, et al. Feasibility analysis of the drinking heated water under fencing fattening mode of beef cattle in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 182-188. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.021 <http://www.tcsae.org>

0 引言

肉牛产业是农牧业发展的重要支柱, 根据国家肉牛牦牛产业技术体系统计, 2020 年全球牛肉总消费量为 5 910.5 万 t, 总贸易量达 1 958.1 万 t; 同年, 中国牛肉进出口贸易量合计约 211.84 万 t, 比 2019 年同比增加 45.87 万 t; 贸易额合计 101.8 亿美元^[1]。近年来中国肉牛产业发展迅猛, 目前正处于改进饲养模式、扩大生产效益的改革阶段。

中国肉牛育肥模式主要是集中育肥, 包括舍内育肥、围栏育肥与放牧育肥 3 种方式。相较于舍内育肥, 围栏育肥和放牧育肥具有固定资产投资少和更适于大规模育肥的优势。国外肉牛育肥多为围栏育肥和放牧育肥。巴西采用围栏育肥与放牧育肥相结合的方式, 在每年 5—11 月多为围栏育肥, 该模式下肉牛日增质量比放牧育肥提高约 50%^[2]; 美国大型肉牛育肥场多采用围栏育肥^[3]; 澳大利亚北部采用传统的放养模式, 南部则实行围栏育肥场集约化饲养^[4]。中国西北地区冬季漫长而寒冷, 直接影响肉牛质量的增加。肉牛生长性能受温度、湿度和风速

等环境因素的综合影响, 中国畜禽场环境质量标准 (NY/T388-1999)^[5]中虽对肉牛场各环境指标做出了规定, 但单一讨论某种环境因素有一定局限性, 因此本试验引入了环境温湿指数 (Temperature Humidity Index, THI)、风冷指数 (Wind Chill Index, WCI)、综合气候指数 (Comprehensive Climate Index, CCI) 和冷应激指数 (Cold Stress Index, CSI) 四种综合环境指标, 来全面评价环境因素对肉牛的影响。西北地区冬季舍内育肥能起到保温和缓解冷风影响的作用, 但与围栏育肥相比, 舍内育肥一般存在饲养密度大, 环境湿度高和空气质量差的问题。冬季围栏育肥模式下环境湿度和有害气体浓度较低, 但存在环境温度低和风速高的问题。研究表明, 冬季寒冷低温环境会导致肉牛生长性能和生产效率降低^[6]。本实验室前期研究发现, 饮用加热水能够显著缓解西北地区冬季寒冷环境对肉牛生长性能造成的不良影响^[7]。经调研发现, 目前西北地区集中育肥模式下, 舍内育肥多提供常温饮水, 而围栏育肥下提供加热饮水正在进一步推广的过程中。然而, 国内外尚未有研究关注冬季育肥牛在围栏育肥并饮用加热水的条件下, 其生长性能是否优于饮用常温水的舍内育肥。张掖市是中国西北地区肉牛养殖重点地区, 本试验在张掖市开展, 旨在探究中国西北地区加热水围栏育肥模式与常温水舍内育肥模式相比, 育肥牛的生长性能和建设投入的差异, 为中国西北地区冬季肉牛育肥模式提供优化方案。

收稿日期: 2021-11-23 修订日期: 2022-01-09

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-37); 中国动物福利标准项目; 中国农业大学 2115 人才工程项目

作者简介: 贺腾飞, 研究方向为畜牧环境工程。Email: hetengfei@cau.edu.cn

*通信作者: 陈昭辉, 副教授, 研究方向为畜牧环境工程。

Email: chenzhaozhui@cau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

本试验在甘肃省张掖市沅博农牧产业开发有限公司开展，其位于中国甘肃省西北部。张掖市夏短冬长，昼夜温差大，夏季酷热，冬季严寒。该地区干旱少雨，且降水分布不均。张掖具有丰富的风能和太阳能资源，主导风向为西北风，风力多为 3~4 级。如表 1 所示，2018 至 2020 年间，在 1 至 3 月份内，张掖市月最高气温为 13.78℃，最低为-15.67℃，月平均降水天数仅 2.89 d/月，西北风 3~4 级天数为 15.44 d/月。

表 1 2018—2020 年 1—3 月张掖气象状况
Table 1 Meteorological conditions of Zhangye from January to March, 2018 to 2020

年份 Year	月份 Month	月最高气温 Monthly maximum temperature/℃	月最低气温 Monthly minimum temperature/℃	月降水天数 Monthly precipitation days/d	西北风 3~4 级天数 Days of level 3-4 Northwest wind/d
2018	1	6	-26	4	20
	2	13	-23	6	21
	3	25	-5	0	21
2019	1	10	-21	6	24
	2	9	-16	4	22
	3	19	-8	0	24
2020	1	5	-16	3	2
	2	17	-17	1	2
	3	20	-9	2	3
平均 Mean	-	13.78	-15.67	2.89	15.44

1.2 试验设计

试验选用 140 头杂交育肥牛，其中加热水围栏育肥组 118 头（平均质量（513.23±39.78）kg），共 6 个重复，每个重复 15~20 头育肥牛，每个重复（围栏）面积为 18 m×18 m；常温水舍内育肥组 22 头（平均质量（515.93±53.42）kg），共 6 个重复，每个重复 3~4 头育肥牛，每个重复（围栏）面积为 20 m×4 m。试验期共 35 d。

试验期间均固定饲喂精料 4 kg/头·d，精料日粮配方和日粮营养成分水平如表 2；粗饲料为干草（50%）与全株玉米青贮（50%）混合，肉牛试验期间饲喂粗饲料 12 kg/头·d。试验期间，每天 8:30 和 14:30 将日粮以全混合日粮（Total Mixed Rations, TMR）形式进行机械饲喂，自由饮水。

表 2 试验精料饲料组成及营养成分（干物质基础）
Table 2 Ingredient and chemical composition of diets (Dry matter basis)

项目 Items	成分 Ingredient	比例 Percentage
精料成分 Ingredients	玉米 Maize	63.00
	麸皮 Wheat bran	5.00
	棉粕 Cotton meal	14.00
	豆粕 Soybean meal	5.00
	预混料 Premix	5.00
	菜饼 Vegetable cake	5.00
	盐 Salt	2.00
营养水平 Nutrient level	小苏打 Baking soda	1.00
	干物质 Dry matter	68.99
	粗蛋白 Crude protein	11.67
	粗脂肪 Crude fat	2.83
	粗纤维 Crude fiber	16.81
	粗灰分 Crude ash	5.04
	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	38.31
	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	22.52
	钙 Calcium	0.31

1.3 育肥模式

1.3.1 加热水围栏育肥模式

本试验用加热水围栏育肥模式如图 1 所示，其东西方向 11 个围栏为一列，共 4 列。其中第二列西侧 4 个围栏和第四列西侧 2 个围栏（图 1 a 阴影标识）为试验用围栏。单个围栏长度和宽度均为 18 m。加热水围栏育肥的地面为自然土壤并铺设少量垫草。试验期间使用加热饮水水槽提供加热饮水。

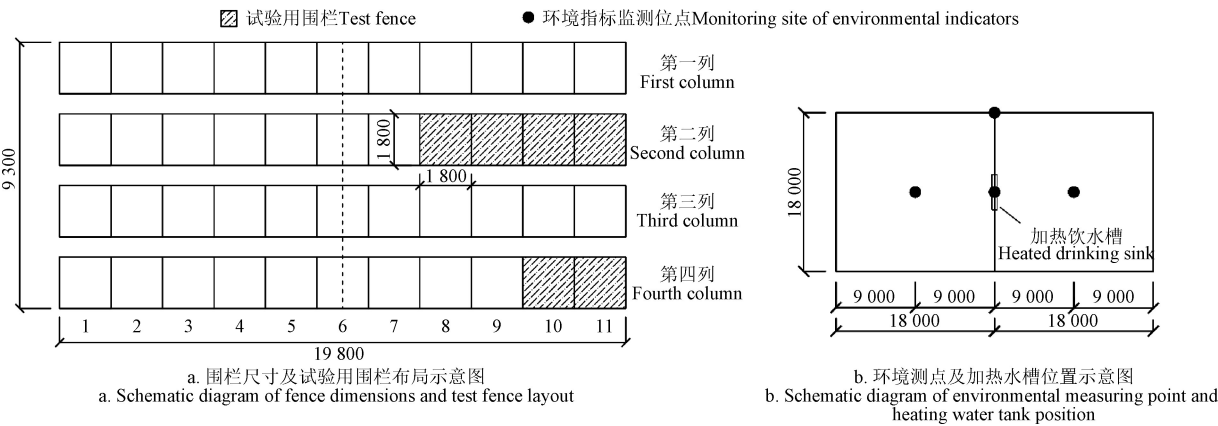


图 1 加热水围栏育肥模式示意图（单位：mm）

Fig.1 Schematic diagram of fencing fattening with heated water

1.3.2 常温水舍内育肥模式

本试验用常温水舍内育肥模式如图 2 所示，牛舍为砖混结构、钢屋架彩钢板弧顶屋面，东西走向。牛舍长 120 m、跨度 12.0 m、檐高 2.5 m。东西两端分别有一正门与走道相连，正门两侧各有一侧门与牛栏相通，门宽

均为 3.0 m、高均为 2.3 m。牛舍为双列中走道布置，南北两侧除立柱外窗户通长设置，窗台高 1.5 m，窗高 1.0 m，供采光与通风，舍内地面为混凝土。舍内南北两侧各 3 个围栏为试验用围栏（图 2 阴影标识），单个围栏长 20 m，宽 4 m；试验期间提供常温饮水。

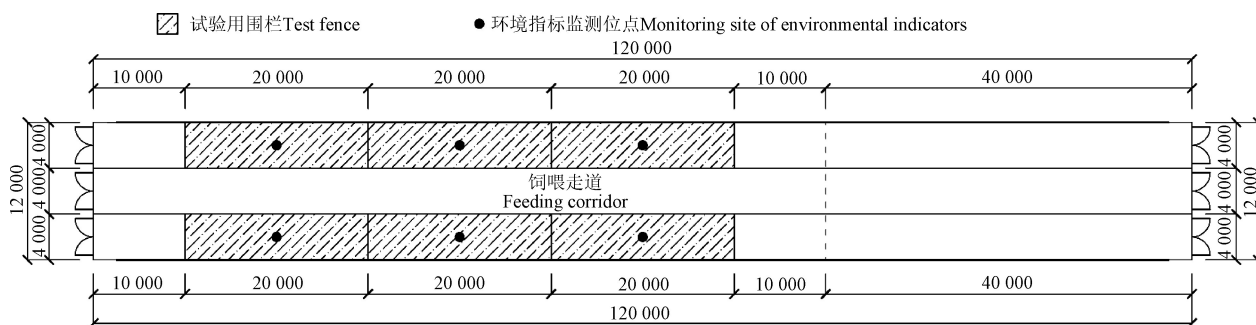


图2 常温水舍内育肥模式示意图(单位: mm)

Fig.2 Schematic diagram of in-house fattening with room temperature water

1.4 环境指标监测与计算

1) 环境指标监测

加热水围栏育肥与常温水舍内育肥环境指标监测布点分别如图1b和图2所示。于试验各栏位中间的0.7和2.0 m高度处布置风速、氨气和二氧化碳记录仪各一个；

于试验各栏位中间的2.0 m高度处布置温湿度自动记录仪一个。

试验期内每天8:30、14:30和20:30测定记录各个监测点的温度、湿度、风速、二氧化碳浓度和氨气浓度，环境指标测定所用仪器如表3所示。

表3 环境指标测定仪器

Table 3 Environmental indicator measurement instrument

测试项目 Item	型号 Model	量程 Range	精度 Precision	生产商 Manufacturer
温湿度 Temperature and humidity	HE810-EX	温度-40~85℃ 湿度0~100%	温度±0.3℃ 湿度±2%	深圳市华图测控系统有限公司
	179-THL	温度-40~100℃ 湿度0~100%	温度±0.2℃ 湿度±1.8%	艾普瑞(上海)精密光电有限公司
风速 Wind speed	MODEL6004	0.1~20.0 m·s ⁻¹	±(5%+0.1)m·s ⁻¹	沈阳加野科学仪器有限公司
二氧化碳 Carbon dioxide	GASTiger2000	0~10 000 mg·kg ⁻¹	±3%	深圳市万安迪科技有限公司
氨气 Ammonia	GT-903	0~100 μmol·mol ⁻¹	±3%	深圳市科尔诺电子科技有限公司

2) 综合环境指标

综合环境指标计算方法及相关阈值如下：
温湿度指数 THI^[8]：

$$THI = 0.72 \times (T_d + T_w) + 40.6 \quad (1)$$

式中 T_d 为干球温度，℃； T_w 为湿球温度，℃。

风冷温度 WCT^[9]：

$$WCT = 24.20 + 1.119T - 23.72V^{0.16} + 0.6765TV^{0.16} \quad (2)$$

式中 T 为大气温度，℃； V 为风速，m/s。

冷应激指数 CSI^[10]：

$$CSI = (11.7 + 3.1V_m^{0.5}) \times (40 - T_m) + 481 + 418 \times (1 - e^{-0.04P_m}) \quad (3)$$

式中 V_m 为日平均风速，m/s； T_m 为日平均温度，℃； P_m 为日平均降水量，本试验中日平均降水量为0，因此 P_m 记为0。

综合气候指数 CCI^[11]：

$$CCI = T_a + E_q \cdot [1] + E_q \cdot [2] + E_q \cdot [3] \quad (4)$$

温度与湿度修正系数 $E_q \cdot [1]$ ：

$$E_q \cdot [1] = e^{(0.00182 \cdot RH + 1.8 \times 10^{-5} T_a \cdot RH)} \times (0.00054T_a^2 + 0.00192T_a - 0.0246) \times (RH - 30) \quad (5)$$

风速修正系数 $E_q \cdot [2]$ ：

$$E_q \cdot [2] = \left(\frac{-6.56}{\left\{ \frac{1}{(2.26WS + 0.23)^{0.45} \cdot (2.9 + 1.14 \times 10^{-6} WS^2.5 - \log_{10}(2.26WS + 0.33))^{-2}} \right\}} \right) - 0.00566WS^2 + 3.33 \quad (6)$$

总辐射修正系数 $E_q \cdot [3]$ ：

$$E_q \cdot [3] = 0.0076RAD - 0.00002RAD \cdot T_a + 0.00005T_a^2 \sqrt{RAD} + 0.1T_a - 2 \quad (7)$$

式中 T_a 为环境温度，℃；RH 为相对湿度，%；WS 为日平均风速，m/s；RAD 为日平均辐射照度，W/m²。

张掖冬季平均日照时数，经估算约为7.41 h/d^[10]；已知太阳常数为1535 W/m²，由此简单估计张掖地区日平均辐射照度为876.25 W/m²。

1.5 生长性能

在试验第1天和第35天晨饲前对试验牛称质量，称量记录试验牛每天的采食质量，计算平均日增质量、平均日采食质量和质量比。

1.6 饮水温度

试验期内每天8:30、14:30和20:30测定记录各饮水槽饮水温度。水温测定仪器的生产商为深圳市乐格电子科技有限公司，型号为TP608，测温范围为-50~300℃，精度为±1℃。

1.7 建筑成本

建设成本=（单位面积土地费用+单位面积建设费用）×
每头牛占地面积 （8）

1.8 统计方法

采用 SPSS 17.0 统计软件方差分析中独立样本 *T* 检验法比较各处理组与对照组间差异显著性，所得数据以“平均值±标准差”^[12]表示。处理组各项以 *P*<0.05 为显著性水平。

2 结果与分析

2.1 不同饲养模式下环境指标

1) 温湿度

试验期间不同育肥模式下的温湿度结果见表 4 和表 5。其中最高温度及最低温度指测定期间所能达到的极端温度；日平均温度用以评价测定期间整体环境温度状态；低于-21℃的总时数与总日数用以评价测定期间极冷环境的发生频率及时长，湿度同。

由表 4 可知，在整个试验期间，加热水围栏育肥组

日平均温度显著低于常温水舍内育肥组（*P*<0.05），且常温水舍内育肥组环境温度均高于肉牛下限临界温度（-21℃），而加热水围栏育肥组环境温度低于肉牛下限临界温度的时长总计达 11.19 h。由表 5 可知，加热水围栏育肥组环境湿度超过 80%的总时长为 76.78 h；而常温水舍内育肥组环境湿度超过 80%的时长为 456.33 h。加热水围栏育肥环境日平均湿度为 49.94%，而常温水舍内育肥环境日平均湿度为 75.79%，加热水围栏育肥组日平均湿度显著低于常温水舍内育肥组（*P*<0.05）。

温湿度结果表明，相较于加热水围栏育肥模式，常温水舍内育肥具有更好的保温性能，能够使环境温度保持在肉牛下限临界温度之上，使肉牛免于冷应激的影响。这主要是由于常温水舍内育肥模式的具有较完备的外围护结构，保温效果更好。而环境湿度结果表明，加热水围栏育肥模式下的环境湿度显著低于常温水舍内育肥。这主要是由于加热水围栏育肥模式下空气流通量大，饲养密度低，能够有效降低环境湿度。

表 4 不同育肥模式的温度
Table 4 Air temperature between different fattening patterns

处理 Treatments	最高温度 Maximum temperature/℃	最低温度 Minimum temperature/℃	日平均温度 Average daily temperature/(℃·d ⁻¹)	温度低于-21℃ Temperature below -21℃	
				总时数 Total hours/h	总日数 Total number of days/d
常温水舍内育肥 House-fattening with room temperature water	18.03a	-10.43a	2.50±4.98a	0.00a	0.00a
加热水围栏育肥 Fence fattening with heated water	21.36a	-22.42a	-4.52±6.56b	11.19a	4.00a

注：不同小写字母表示不同饲养模式间的差异显著性（*P*<0.05），下同。
Note: The different lowercase letters indicate the significant difference between different stocking modes (*P*<0.05), the same below.

表 5 不同育肥模式的相对湿度
Table 5 Air relative humidity between different fattening patterns

处理 Treatments	最高相对湿度 Maximum relative humidity/%	最低相对湿度 Minimum relative humidity/%	日平均相对湿度 Average daily relative humidity/(%·d ⁻¹)	相对湿度高于 80% Relative humidity above 80%	
				总时数 Total hours/h	总日数 Total number of days/d
常温水舍内育肥 House-fattening with room temperature water	100.00a	22.34a	75.79±14.78a	456.33a	29.00a
加热水围栏育肥 Fence fattening with heated water	96.28a	5.40a	49.94±12.73b	76.78a	15.00a

2) 风速、氨气浓度和二氧化碳浓度

试验期间不同育肥模式下各时刻风速、氨气浓度和二氧化碳浓度结果如表 6 所示。试验期间，无论是在 0.7 m 高度还是在 2.0 m 高度，常温水舍内育肥的

环境风速均显著低于加热水围栏育肥的环境风速（*P*<0.05）；常温水舍内育肥的环境氨气浓度与二氧化碳浓度在 0.7 和 2.0 m 高度处均显著高于加热水围栏育肥（*P*<0.05）。

表 6 不同育肥模式间的风速、氨气浓度与二氧化碳浓度
Table 6 Wind velocity, ammonia concentration and carbon dioxide concentration between different fattening patterns

时刻 Time	高度 Height/m	风速 Wind velocity/(m·s ⁻¹)		NH ₃ 质量浓度 Mass concentration of ammonia/(mg·m ⁻³)		CO ₂ 质量浓度 Mass concentration of carbon dioxide/(mg·m ⁻³)	
		常温水舍内育肥 House-fattening with room temperature water	加热水围栏育肥 Fence fattening with heated water	常温水舍内育肥 House-fattening with room temperature water	加热水围栏育肥 Fence fattening with heated water	常温水舍内育肥 House-fattening with room temperature water	加热水围栏育肥 Fence fattening with heated water
8:30	0.7	0.25±0.08 Aa	1.18±0.27Ab	5.10±0.68Ba	0.01±0.02 Ab	2 337.40±313.38ABa	1 181.29±44.57 Ab
	2.0	0.16±0.04 Aa	1.50±0.39 Ab	5.84±1.34Aa	0.01±0.02 Ab	2 614.12±279.98Ba	1 188.56±39.63 Ab
14:30	0.7	0.28±0.07 Aa	1.46±0.46 Ab	2.93±1.51Aa	0.00±0.00 Ab	1 972.77±262.01Aa	1 135.74±25.41 Ab
	2.0	0.24±0.10 Aa	1.81±0.60 Ab	3.99±1.92Aa	0.00±0.00 Ab	2 084.21±346.67Aa	1 137.52±25.58 Ab
20:30	0.7	0.21±0.09 Aa	1.51±0.50 Ab	3.98±1.16ABa	0.02±0.05 Ab	2 658.24±281.18Ba	1 149.96±27.55 Ab
	2.0	0.15±0.04 Aa	1.94±0.77 Ab	4.61±1.53Aa	0.02±0.06 Ab	2 939.19±299.87Ba	1 147.52±29.96 Ab

注：不同大写字母表示同一高度不同时刻的差异显著性（*P*<0.05）。
Note: Different capital letters indicate the significance of the difference at different times at the same height (*P*<0.05).

试验期间，加热水围栏育肥模式下的风速较高，说明加热水围栏育肥模式的挡风能力差，空气流通量

大。比较全天 3 个时间点常温水舍内育肥和加热水围栏育肥的风速变化情况，发现各时间点之间风速差异

不显著 ($P>0.05$), 表明试验环境风速在同一天内较为稳定; 试验期间常温水舍内育肥和加热水围栏育肥在 3 个时间点和 2 个位置高度的环境氨气浓度均未超标, 即 NH_3 质量浓度不超过 20 mg/m^3 。而常温水舍内育肥组的环境 CO_2 浓度, 除 14:30 的 0.7 m 位置外, 其余均高于 1500 mg/m^3 , 超出了国家农业行业标准畜牧场环境质量标准的规定。表明常温水舍内育肥组的环境空气质量较差。

3) 综合环境指标

综合环境指标结果如表 7 所示。常温水舍内育肥组的环境 THI、WCI、CCI 分别为 (34.71 ± 1.77) 、 $(117.82 \pm 9.16) \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h}$ 和 $(-6.56 \pm 1.58) ^\circ\text{C}$, 均显著高于 ($P<0.05$) 加热水围栏育肥组的 (21.74 ± 2.78) 、 $(12.38 \pm 10.38) \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h}$ 和 $(-8.35 \pm 1.09) ^\circ\text{C}$ 。

表 7 不同育肥模式间的综合环境指标

Table 7 Comprehensive environmental indicators between different fattening pattern

处理 Treatments	温湿度指数 Temperature humidity index	风冷指数 Wind chill index/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	综合气候指数 Comprehensive climate index/ $^\circ\text{C}$	冷应激指数 Cold stress index/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
常温水舍内育肥 House-fattening with room temperature water	$34.71 \pm 1.77\text{a}$	$117.82 \pm 9.16\text{a}$	$-6.56 \pm 1.58\text{a}$	$1067.85 \pm 12.56\text{b}$
加热水围栏育肥 Fence fattening with heated water	$21.74 \pm 2.78\text{b}$	$12.38 \pm 10.38\text{b}$	$-8.35 \pm 1.09\text{b}$	$1301.69 \pm 7.87\text{a}$

此外, 常温水舍内育肥组的环境 CSI 为 $(1067.85 \pm 12.56) \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h}$, 显著低于加热水围栏育肥组的

$(1301.69 \pm 7.87) \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h}$ 。肉牛的生长受温度、湿度和风速等环境因素的综合影响, 单一讨论某种环境因素有一定局限性, 本试验引入了以上 4 种综合环境指标, 能够更加全面有效地评价环境因素对肉牛的影响。由综合环境指标可以发现, 常温水舍内育肥模式的环境保温御寒和抵御风冷的效果优于加热水围栏育肥模式, 这与结果 1) 中常温水舍内育肥模式组环境温度显著升高和 2) 中其风速显著降低的结论是一致的。

2.2 不同饲养模式下肉牛的生长性能和饮水温度

试验期间不同育肥模式下肉牛的生长性能和饮水温度如表 8 所示。两种育肥模式的肉牛平均初始质量、末质量和平均日采食量间均无显著差异 ($P>0.05$)。加热水围栏育肥肉牛的平均日增质量为 $(1.40 \pm 0.39) \text{ kg/d}$, 显著高于常温水舍内育肥组的 $(1.14 \pm 0.47) \text{ kg/d}$ ($P<0.05$), 加热水围栏育肥肉牛的平均日采食质量与日增质量比为 8.83 ± 3.63 , 显著低于常温水舍内育肥组的 12.11 ± 6.34 ($P<0.05$); 此外, 试验期间加热水围栏育肥组的平均饮水温度为 $(20.58 \pm 0.91) ^\circ\text{C}$, 显著高于常温水舍内育肥组的 $(7.20 \pm 1.70) ^\circ\text{C}$ ($P<0.05$)。以上结果表明, 加热水围栏育肥模式能够显著提高育肥牛日增质量, 缩短育肥周期。这可能是由于加热水围栏育肥肉牛饮水温度显著高于常温水舍内育肥组所致, 冬季肉牛饮用加热水可提高瘤胃稳定性, 并通过促进瘤胃微生物菌群发酵提高饲料利用率, 进一步缓解冷环境对肉牛的刺激, 并提高肉牛机体健康和生长性能。

表 8 不同育肥模式间的肉牛生产性能

Table 8 Growth performance of beef cattle between different fattening pattern

处理 Treatments	初质量 Initial body weight/kg	末质量 Final body weight/kg	平均日增质量 Average daily gain/($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	平均日采食量 Average daily feed intake/($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	料质量比 Feed conversion rate	平均饮水温度 Average water temperature/ $^\circ\text{C}$
常温水舍内育肥 House-fattening with room temperature water	$515.93 \pm 53.42\text{a}$	$560.27 \pm 54.94\text{a}$	$1.14 \pm 0.47\text{b}$	$13.81 \pm 3.02\text{a}$	$12.11 \pm 6.34\text{a}$	$7.20 \pm 1.70\text{b}$
加热水围栏育肥 Fence fattening with heated water	$513.23 \pm 39.78\text{a}$	$567.73 \pm 38.41\text{a}$	$1.40 \pm 0.39\text{a}$	$12.36 \pm 1.42\text{a}$	$8.83 \pm 3.63\text{b}$	$20.58 \pm 0.91\text{a}$

2.3 张掖地区围栏育肥与舍内育肥建设投入比较

根据具体建设费用或估计值计算单位面积建设费用, 该部分建设费用仅包含育肥区域。该地区单位面积土地费用以 $0.78 \text{ 元}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 估计, 使用年限为 50 a 时, 即为 $39 \text{ 元}/\text{m}^2$ 。加热水围栏育肥与常温水舍内育肥肉牛饲养密度不同, 每头牛所占建筑面积不同, 因此建设成本计算时考虑以元/头为单位。

以围栏育肥及舍内育肥区域单位面积建筑单价估计。围栏育肥区域总建筑面积 80000 m^2 , 建设投入约 1040 万元 (含设备投入, 不含土地成本), 合 $130 \text{ 元}/\text{m}^2$ 。建成区域可饲养 4400 头育肥牛, 合每头牛占地 18 m^2 , 土地成本约 $39 \text{ 元}/\text{m}^2$, 围栏育肥区域建筑成本约合 3042 元/头。

舍内育肥据建筑形式估计, 以地面面积为单位: 砖混结构约 $300 \text{ 元}/\text{m}^2$; 彩钢板屋面约 $80 \text{ 元}/\text{m}^2$; 混凝土地面约 $150 \text{ 元}/\text{m}^2$; 门窗约 $30 \text{ 元}/\text{m}^2$; 水电共投资约 40000 元, 1440 m^2 建筑面积合 $30 \text{ 元}/\text{m}^2$; 设备投资约 $50 \text{ 元}/\text{m}^2$, 合计约 $640 \text{ 元}/\text{m}^2$ 。舍内育肥可饲养 200 头育肥牛, 合每头牛占地 7.2 m^2 , 土地成本约 $39 \text{ 元}/\text{m}^2$, 舍内育肥区域建筑

成本约合 4889 元/头。可见张掖地区围栏育肥建设模式投入较舍内育肥模式低 37.78%。

3 讨论

温度、湿度和风速等温湿环境是影响肉牛生长性能的重要环境因素。肉牛在育肥期的适宜环境温度为 $3 \sim 20 ^\circ\text{C}$ [13], 下限临界温度为 $-21 ^\circ\text{C}$ [14]。寒冷环境可能导致肉牛产生冷应激, 进而影响肉牛的神经系统 [15], 间歇性冷刺激会增大肉牛体温波动, 影响肉牛代谢水平, 同时低温环境下肉牛需要额外的热量维持体温, 理论上环境温度每下降 $1 ^\circ\text{C}$, 肉牛所需维持能量约提高 2.89 kJ/kg 代谢质量 [16]。本试验中, 与常温水舍内育肥组相比, 加热水围栏育肥组的环境温度显著降低, 理论上更不利于肉牛生长。然而本试验结果表明, 加热水围栏育肥组肉牛的平均日增质量显著高于常温水舍内育肥组, 且日采食质量与体增质量比显著降低。这可能是由于与常温水舍内育肥相比, 加热水围栏育肥环境温度虽有所降低, 但并未达到显著影响肉牛生长性能的程度。根据 Kennedy 等 [17]

研究结果表明, 在 -20°C 环境下, 每天 10 h 持续 21 d 的间歇性冷暴露对肉牛静息产热无显著影响。本试验条件下, 加热水围栏育肥的日最低温度为 -22.42°C , 低于 -21°C 的总时数为 11.19 h, 因此该低程度和短时间的冷刺激可能并未对肉牛生长性能产生显著影响。此外, 从综合环境指标来看, 加热水围栏育肥的综合环境指标 THI、WCI 和 CCI 均显著降低, CSI 指标显著升高。这主要是由于与常温水舍内育肥相比, 加热水围栏育肥的环境温度虽然降低, 但空气流通率提高, 进而降低了环境湿度, 更有利于肉牛生长。Mader 等^[18]对动物的环境压力综合指数进行了评估, 对于低敏感动物群体, 当 CCI 指数在 -10 到 0°C 的范围之内, 动物均处于轻度应激水平; 对于高敏感群体, 当 CCI 指数在 -10 到 -5°C 的范围之内, 动物处于重度应激水平。而本试验计算所得加热水围栏育肥和常温水舍内育肥的 CCI 指数均在 -10 到 -5°C 的范围之内, 即两模式下的肉牛处在相同等级的应激水平, 这可能是与常温水舍内育肥相比, 加热水围栏育肥肉牛生长性能并未显著降低的原因之一。

畜舍内有害气体的产生量与舍内动物数量呈正比^[19]。冬季通风不足条件下, 舍内饲养动物越多, 有害气体浓度增长越快。肉牛育肥过程中产生的有害气体主要为 NH_3 , 长期低浓度 NH_3 环境可造成肉牛慢性氨中毒, 导致肉牛生长性能降低; 高浓度 NH_3 环境下, 不仅会降低肉牛生长性能, 还会导致肉牛的肝肾功能损伤, 降低肉牛的免疫力和抗氧化能力^[20]。此外, 长期暴露于高浓度 CO_2 环境也会引起肉牛慢性缺氧, 从而导致育肥牛机体虚弱, 生长性能降低。本试验中, 常温水舍内育肥和加热水围栏育肥的环境 NH_3 浓度均低于中国畜禽场环境质量标准(NY/T388-1999)^[5]中对肉牛场 NH_3 浓度的规定 20 mg/m^3 ; 在 CO_2 浓度方面, 加热水围栏育肥的 CO_2 浓度低于畜禽场环境质量标准中对肉牛场 CO_2 浓度的规定 $1\ 500\text{ mg/m}^3$, 而常温水舍内育肥所监测的 3 个时间点下的 0.7 和 2.0 m 高度处 CO_2 浓度均高于 $1\ 500\text{ mg/m}^3$, 不符合畜禽场环境质量标准, 因此常温水舍内育肥模式对肉牛福利和健康会造成不利影响。出现这种差异的主要原因是加热水围栏育肥不受外围护结构的限制, 能够加快空气流通, 使肉牛产生的有害气体迅速扩散至空气中充分稀释, 从而使环境空气质量得到改善。

本试验条件下, 加热水围栏育肥肉牛饮水温度显著高于常温水舍内育肥组, 这可能是造成加热水围栏育肥肉牛生长性能显著升高的另一重要原因。研究表明, 冬季肉牛饮用加热水可提高瘤胃稳定性, 并通过促进瘤胃微生物菌群发酵提高饲料利用率^[21]。陈昭辉等^[22]研究表明, 冬季肉牛饮水温度由 10 增加至 20°C , 肉牛平均日增质量增长 33%, 生长性能显著升高, 表明饮用加热水可有效缓解冬季寒冷环境对肉牛生长的不良影响。蔡景义等^[23]研究也发现, 提高冬季肉牛的饮水温度可使肉牛平均日增质量增加 0.14 kg ; 刁小南等^[24]也得出相似结果, 认为 20°C 的温水能够显著提高肉牛的日增质量。本试验结果与上述研究相符, 表明与常温水舍内育肥相比, 饮用加

热水能够缓解围栏育肥下的寒冷环境影响。

4 结 论

1) 环境指标结果表明, 除温度、风速外, 与常温水舍内育肥模式相比, 加热水围栏育肥模式下的环境湿度、有害气体浓度均显著降低, 更利于育肥肉牛生长。

2) 肉牛在加热水围栏育肥模式下的平均日增质量为 $(1.40\pm0.39)\text{ kg/d}$, 显著高于常温水舍内育肥组的 $(1.14\pm0.47)\text{ kg/d}$, 加热水围栏育肥肉牛的日采食质量与日增质量比为 8.83 ± 3.63 , 显著低于常温水舍内育肥组的 12.11 ± 6.34 。表明冬季围栏育肥配合加热水能够缓解低温和高风速的影响, 更有利于育肥牛生长。

3) 张掖地区加热水围栏育肥建设成本投入较常温水舍内育肥低 37.78%, 有利于减少肉牛育肥的前期投入, 提高生产效益。

综上所述, 冬季张掖地区加热水围栏育肥饲养模式下, 冷环境未对肉牛生长产生不利影响, 肉牛平均日增质量显著高于常温水舍内育肥模式, 且建设成本更低, 该模式适宜在张掖地区使用。

[参 考 文 献]

- [1] 曹兵海, 张越杰, 李俊雅, 等. 2020 年度肉牛牦牛产业技术发展报告[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(3): 240-245.
- [2] 曹兵海, 万发春, 王之盛. 巴西肉牛产业链[J]. 中国畜牧业, 2012(6): 50-53.
- [3] 王峰, 胡明, 成立新, 等. 赴美国肉牛规模化生产技术考察团考察报告(二): 释惑美国肉牛生产技术之妙[J]. 畜牧与饲料科学, 2013, 34(10): 99-101.
Wang Feng, Hu Ming, Cheng Lixin, et al. Report on the investigation of scale production technique for beef cattle in USA (II): Uncover the wonderfulness of animal beef production technology[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2013, 34(10): 99-101. (in Chinese with English abstract)
- [4] 徐杨. 澳大利亚畜牧业概况[J]. 中国畜牧业, 2019(24): 48-49.
Xu Yang. Overview of animal husbandry in Australia[J]. China Animal Industry, 2019(24): 48-49. (in Chinese with English abstract)
- [5] 中华人民共和国农业部. 畜禽场环境质量标准: NY/T388-1999[S]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [6] Birkelo C P, Johnson D E, Phetteplace H P. Maintenance requirements of beef cattle as affected by season on different planes of nutrition[J]. Journal of Animal Science, 1991, 69(3): 1214-1222.
- [7] 庞超. 冬季恒温饮水系统对肉牛生产性能的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
Pang Chao. Effects of Water Supply System on Beef Cattle Production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [8] Brown-Brandt T M, Eigenberg R A, Nienaber J A, et al. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle, Part 1: Analyses of indicators[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 451-462.
- [9] Tew M A, Battel G, Nelson C A. Implementation of a new wind chill temperature index by the national weather service [J]. 18th Int. Conf. Interactive information and processing systems (IIPS) for meteorology, oceanography, and hydrology, orlando, FL. Am. Meteor. Soc. 2002, 203-205.
- [10] Ugurlu M, Teke B, Akdag F, et al. Effect of temperature-humidity index, cold stress index and dry period lenght on birth weight of jersey calf[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2014, 20(5): 1227-1232.
- [11] Mader T L, Johnson L J, Gaughan J B. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals[J].

- Journal of Animal Science, 2010, 88(6): 2153-2165.
- [12] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件: 兼与刘玉玫, 卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005(3): 65-69.
- [13] 王聪. 肉牛饲养手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- [14] 刘振宇, 杨桂青. 环境温度对肉牛肥育效果的影响及肉牛最佳经济利用年龄[J]. 当代畜牧, 2006(4): 8-13.
- [15] 刘莉莉, 初芹, 徐青, 等. 动物冷应激的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(16): 8937-8940.
Liu Lili, Chu Qin, Xu Qing, et al. Research progress of cold stress in animal[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(16): 8937-8940. (in Chinese with English abstract)
- [16] Bergen R D, Kennedy A D, Christopherson R J. Effects of intermittent cold exposure varying in intensity on core body temperature and resting heat production of beef cattle[J]. The Canadian Veterinary Journal, 2001, 81(4): 459-465.
- [17] Kennedy A D, Bergen R D, Christopherson R J, et al. Effect of once daily 5-h or 10-h cold-exposures on body temperature and resting heat production of beef cattle[J]. Canadian Journal of Animal Science, 2005, 85(2): 177-183.
- [18] Mader T L, Johnson L J, Gaughan J B. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals[J]. Journal of Animal Science, 2010, 88(6): 2153-2165.
- [19] 陈昭辉, 刘玉欢, 吴中红, 等. 饲养密度对饲养环境及肉牛生产性能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 229-235.
Chen Zhaohui, Liu Yuhuan, Wu Zhonghong, et al. Effect of stocking density on breeding environment and production performance of beef cattle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(19): 229-235. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李东卫, 卢庆萍, 白水莉, 等. 模拟条件下鸡舍氨气浓度对肉鸡生长性能和日常行为的影响[J]. 动物营养学报, 2012, 24(2): 322-326.
Li Dongwei, Lu Qingping, Bai Shuili, et al. Effects of ammonia concentration in poultry house on growth performance and conventional behavior of broilers under simulated conditions[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition 24(2): 322-326. (in Chinese with English abstract)
- [21] Grossi S, Rossi L, Dell'Anno M, et al. Effects of heated drinking water on the growth performance and rumen functionality of fattening charolaise beef cattle in winter[J]. Animals, 2021, 11(8): 2218.
- [22] 陈昭辉, 庞超, 靳薇, 等. 基于水温对肉牛生长性能影响的冬季恒温饮水系统优选[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 212-218.
Chen Zhaohui, Pang Chao, Jin Wei, et al. Optimization of water supply system with constant temperature in winter based on effect of water temperature on growth performance of beef cattle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(24): 212-218. (in Chinese with English abstract)
- [23] 蔡景义, 颜东, 陈德林, 等. 冬季恒温饮水和饲料添加酵母水解物改善肉牛生长性能[J]. 畜禽业, 2017(Z1): 21-24.
Cai Jingyi, Yan Dong, Chen Delin, et al. Thermostatic apparatus for drinking water and yeast hydrolyzate supplementation improving growth performance of beef cattle in winter[J]. Livestock and Poultry Industry, 2017(Z1): 21-24. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刁小南, 王美芝, 陈昭辉, 等. 冬季恒温饮水装置和屋顶采光对提高肉牛生长速率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 164-172.
Diao Xiaonan, Wang Meizhi, Chen Zhaohui, et al. Effects of thermostatic apparatus for drinking water and roof-lighting system on improvement of growth rate of beef cattle in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 164-172. (in Chinese with English abstract)

Feasibility analysis of the drinking heated water under fencing fattening mode of beef cattle in winter

He Tengfei^{1,2}, Liu Tianxu^{1,2}, Long Shenfei^{1,2}, Zhang Xiaojun^{1,2}, Liu Ruibing^{1,2},
Ling Xiaofan², Liu Jijun^{1,2}, Chen Zhaohui^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This study aims to clarify the effects of drinking warm water under fencing fattening modes on the growth performance of beef cattle in winter. A field experiment was carried out in the Zhangye area under the two modes: fencing fattening with warm water (average drinking water temperature: $(20.58 \pm 0.91)^\circ\text{C}$), and house-fattening with cold water (average drinking water temperature: $(7.20 \pm 1.70)^\circ\text{C}$). Some thermal parameters were measured, including the temperature-humidity index (THI), wind chill index (WCI), comprehensive climate index (CCI), and cold stress index (CSI). 140 fattening cattle were collected to divide into two groups, including a fence fattening with warm water group, and a house-fattening with cold water group. In the warm water group, 118 fattening cattle (average body weight at (513.23 ± 39.78) kg) were divided into 6 repetitions with 15 to 20 fattening cattle each repetition, and the area of each repetition (fence) was $18\text{ m} \times 18\text{ m}$. In the cold water group, 22 fattening cattle (average body weight at (515.93 ± 53.42) kg) were divided into 6 replicates with 3 to 4 fattening cattle in each replicate, and the area of each replicate (fence) was $20\text{ m} \times 4\text{ m}$. The period of this experiment was last for 35 days. The total mixed ration (TMR) was mechanically fed at 8:30 and 14:30 every day, and the water was taken freely for each fattening cattle. Some parameters were measured and recorded at 8:30, 14:30, and 20:30 each day, including the air temperature, humidity, wind speed, carbon dioxide concentration, ammonia concentration, and the drinking water temperature. The fattening cattle were weighed in the morning before feeding on the 1st and 35th day of the experiment, where the feed was weighed and recorded each day. As such, the average daily gain, average daily feed intake, and feed conversion rate were calculated, according to the feed. The results showed that there were significantly lower air temperature, humidity, pollutant gas concentration, THI, WCI, and CCI of fencing-fattening with warm water ($P < 0.05$), whereas, the wind speed and CSI index was significantly higher ($P < 0.05$), compared with the cold water group. The average daily gain of the fencing fattening with warm water beef cattle was (1.40 ± 0.39) kg/d, which was significantly higher than the (1.14 ± 0.47) kg/d of the house-fattening with cold water beef cattle ($P < 0.05$). The feed conversion ratio of the fencing fattening with warm water beef cattle was significantly lower ($P < 0.05$) than that of house-fattening with cold water beef cattle. The construction cost of fencing fattening with warm water was 37.78% lower than that of in-house fattening with cold water. In conclusion, the fencing fattening with warm water mode in winter presented a lower environmental humidity and less harmful gas concentration, such as carbon dioxide and ammonia for fattening cattle, which was more conducive to the growth of beef cattle.

Keywords: temperature; environmental regulations; fattening cattle; fencing fattening; house-fattening; water temperature; growth performance