

饲喂不同比例蒸汽压片玉米对西门塔尔牛肉风味物质的影响

李丽杰^{1*}, 李晓东², 查干其其格¹, 王越男¹, 付雅玲³, 包颖³

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018)

(2. 内蒙古财经大学职业学院, 内蒙古呼和浩特 010070)

(3. 内蒙古米稻家生态科技有限公司, 内蒙古兴安盟 029400)

摘要: 为研究蒸汽压片玉米对西门塔尔牛肉风味物质的影响, 选择体重接近的西门塔尔肉牛 30 头, 随机分为 3 组, 试验 I 组蒸汽压片玉米质量分数为 100%, 试验 II 组蒸汽压片玉米质量分数为 50%, 对照组不添加蒸汽压片玉米。采用氨基酸分析仪、气相色谱结合气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 对饲喂不同比例蒸汽压片玉米的牛肉进行游离氨基酸、脂肪酸及挥发性风味物质等指标分析, 明确不同比例蒸汽压片玉米对牛肉风味的影响。结果表明: 游离氨基酸总量试验 I 组、试验 II 组分别比对照组高 10.81%、8.53%, 其中鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量随着蒸汽压片玉米添加量增加发生显著提升; 试验组牛肉中的总脂肪酸含量明显升高, 尤其单不饱和脂肪酸含量试验 I 组、试验 II 组分别比对照组高 81.82%、44.03%, 并且只在试验 I 组中检测到了 C18:2n6t (反式亚油酸), 含量为 1.65 mg/100 g; 各类挥发性风味物质也发生明显的变化, 如酮类物质在试验 I 组中相对含量最高为 7.64%, 辛醛、十二醛、壬醛在试验 I 组中含量显著高于另外两组, 分别为 6.37%、2.55%、29.11%, 并且只在试验 I 组中检测出具有油脂香和甜香的反-2-十一烯醇, 含量为 0.19%。综上得出, 增加肉牛日粮中蒸汽压片玉米比例对牛肉中游离氨基酸、脂肪酸及挥发性物质含量具有差异性提升作用, 对改善牛肉风味有显著效果 ($P<0.05$), 该研究为提高当地牛肉品质及生产效率提供参考。

关键词: 蒸汽压片玉米; 氨基酸; 脂肪酸; 挥发性风味物质; 风味

文章编号: 1673-9078(2026)5-336-345

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0154

Effects of Different Proportions of Steam-flaked Corn on Flavor Compounds in Simmental Beef

LI Lijie^{1*}, LI Xiaodong², CHAGAN Qiqige¹, WANG Yuenan¹, FU Yaling³, BAO Ying³

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohot 010018, China)

(2. Vocational College, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohot 010070, China)

(3. Inner Mongolia Midaojia Ecological Technology Co. Ltd., Horqin Right Middle Banner, Xing'an League 029400, China)

Abstract: To investigate the effects of steam-flaked corn on flavor compounds in Simmental beef, 30 Simmental cattle with similar body weights were randomly assigned to three dietary groups. Group I received a diet containing 100% steam-flaked corn, Group II received and 50% steam-flaked corn, and the control group was fed a diet without steam-flaked corn. An amino acid

引文格式:

李丽杰, 李晓东, 查干其其格, 等. 饲喂不同比例蒸汽压片玉米对西门塔尔牛肉风味物质的影响[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 336-345.

LI Lijie, LI Xiaodong, CHAGAN Qiqige, et al. Effects of different proportions of steam-flaked corn on flavor compounds in simmental beef [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 336-345.

收稿日期: 2025-02-10; 修回日期: 2025-05-03; 接受日期: 2025-05-12

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目 (2022YFXZ0022)

作者简介: 李丽杰 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农畜产品加工, E-mail: lilijie1978@163.com

analyzer combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to determine the contents of free amino acids, fatty acids, and volatile flavor compounds in beef, with the aim of clarifying the influence of different proportions of steam-flaked corn on beef flavor. The results showed that the total free amino acid contents in Group I and II were 10.81% and 8.53% higher, respectively, than that of the control group. The contents of umami and sweet amino acids increased significantly with increasing proportions of steam-flaked corn. Total fatty acid contents in the beef of the experimental groups were also significantly higher than those of the control group. Notably, the contents of monounsaturated fatty acids in Groups I and II were 81.82% and 44.03% higher, respectively, than those of the control group. Trans-linoleic acid (C18:2n6t) was detected only in Group I, with a content of 1.65 mg/100 g. Significant differences were also observed in volatile flavor compounds. The relative content of ketones was the highest in Group I (7.64%). Moreover, the contents of octanal (6.37%), dodecanal (2.55%), and nonanal (29.11%) in Group I were significantly higher than those in the other groups. Trans-2-undecanol, which imparts oily and sweet aromas, was detected exclusively in Group I at a content of 0.19%. Overall, increasing the proportion of steam-flaked corn in cattle diets significantly enhanced the contents of free amino acids, fatty acids, and volatile compounds in beef, thereby improving beef flavor ($P<0.05$). This study provides a reference for improving beef quality and production efficiency.

Key words: steam-flaked corn; amino acids; fatty acids; volatile flavor compounds; beef flavor

肉类的风味是对肉进行评价的一个重要部分，肉类中的氨基酸及其构成不仅对提升肉类的营养水平有很大作用，而且对肉类的品质也有很大的影响^[1]。汪倩^[2]及 Shi 等^[3]研究表明，肉中的氨基酸是一大类非常重要的呈味物质，肉品味道的鲜美程度和它所含的呈味氨基酸有关。同时氨基酸也是某些芳香化合物的前体物质，不同种类氨基酸对牛肉的风味影响不同^[4]。

国内外研究发现，肉类中很多影响风味的化合物都与肉中的脂肪酸有关^[5-8]，特别是肉中的不饱和脂肪酸经过脂质氧化形成多种氢过氧化物，然后在氢裂解酶的作用下打破氢过氧化物的碳碳键，产生醛、酮、醇等大量具有独特风味的挥发性风味物质，同时脂质氧化与美拉德反应及蛋白质氧化、氨基酸降解产物的相互关联也是影响牛肉风味形成的有效途径^[9,10]。罗玉龙等^[11]研究表明，不饱和脂肪酸除了具有特殊生理功能外，还与肉类的营养品质密切相关，其氧化生成的产物会对肉类的香味成分构成产生重要的调控作用，并且以油酸（C18:1）为首的不饱和脂肪酸是牛肉中发挥风味作用的脂肪酸。

蒸汽压片技术是一种高级的粮食谷物处理方式，是指通过一系列精细工艺，将普通粮食谷物加工成片状粮食^[12]。蒸汽压片技术能够优化玉米的营养结构，显著提升了玉米的营养价值，增强了畜禽对玉米的消化能力^[13-18]。一些研究表明，蒸汽压片玉米可以增加肥育牛的脂肪沉积，而油脂的堆积程度与大理石纹理相关，“大理石纹”则是牛肉中富含油脂、具有特殊香味的标志，也是牛肉品质的最直观反映^[19]。此外，有研究表明，饲料的改变还可提高牛肉中不饱和脂肪酸

（UFA）及共轭亚油酸（CLA）的含量^[20]。目前蒸汽压片玉米对牛肉品质的研究主要集中在肥育等方面，随着人们对牛肉风味等各项性能的需求也越来越高，有关蒸汽压片玉米对牛肉风味作用机制的研究逐渐展开。

为了进一步提升内蒙古兴安盟科右中旗当地肉牛品质，本研究以不同比例蒸汽压片玉米饲喂西门塔尔肉牛，研究蒸汽压片玉米对牛肉中游离氨基酸、脂肪酸及挥发性风味物质的影响，为改善舍饲牛肉的风味提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

西门塔尔牛肉，内蒙古兴安盟科右中旗提供；5-磺基水杨酸、焦性没食子酸、正己烷、氯化钠、无水硫酸钠、盐酸、无水乙醇，北京国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

LA8080 高速氨基酸分析仪，日本株式会社日立高新技术科学集团；GC-MS 气相色谱质谱联用仪，山东赛曼仪器设备有限公司；Clarus690 PE 气相色谱仪，珀金埃尔默股份有限公司；5810-R 型低温台式冷冻离心机，德国 Eppendorf 公司；JXFSTPRP-CL-48L 冷冻研磨仪，上海净信实业发展有限公司；EXRE-5002 旋转蒸发仪，河南省艾瑞德仪器设备有限公司；宏华 HH-6 数显恒温水浴锅，常州金坛宏华仪器厂。

1.3 试验动物和试验设计

本试验选取健康、20月龄左右、体质量为(400±20) kg的科右中旗西门塔尔牛30头,随机分为3组,每组5个重复,每个重复2头牛,试验结束后分别选取外脊进行各项指标测定。对照组日粮不添加蒸汽压片玉米、试验I组用质量分数100%蒸汽压片玉米全部替代普通粉碎玉米、试验II组用质量分数50%蒸汽压片玉米部分替代普通粉碎玉米。试验共160 d,其中预试期10 d,正试期150 d。本试验选用的蒸汽压片玉米由内蒙古米稻家生态科技有限公司生产,试验在内蒙古兴安盟科右中旗农民养殖专业合作社肉牛场进行。

1.4 试验饲粮与饲养管理

1.4.1 TMR饲粮

参照《肉牛饲养标准》(NY/T 815-2004),设计西门塔尔肉牛基础TMR饲粮,对照组肉牛饲喂基础TMR饲粮,饲粮精粗比为55:45,玉米含量为35.00%,粗饲料以全株玉米青贮、紫花苜蓿草为主。试验I组、II组分别用100%、50%的蒸汽压片玉米替代粉碎玉米。试验饲粮组成及营养水平见表1。

表 1 饲粮组成及营养水平

Table 1 Diet composition and nutrient level				
	项目	对照组	试验 I 组	试验 II 组
原料组成/%	粉碎玉米	35.00	0	17.25
	蒸汽压片玉米	0	35.00	17.25
	紫花苜蓿干草	15.00	15.00	15.00
	全株玉米青贮	25.00	25.00	25.00
	豆粕	10.00	10.00	10.00
	菜粕	5.00	5.00	5.00
	麦麸	5.00	5.00	5.00
	食盐	1.00	1.00	1.00
	碳酸氢钠	1.00	1.00	1.00
	预混料	3.00	3.00	3.00
	合计	100.00	100.00	100.00
营养水平	总能/(MJ·kg ⁻¹)	13.21	13.21	13.21
	粗蛋白/%	11.54	11.58	11.55
	粗脂肪/%	3.46	3.37	3.42
	干物质/%	55.45	55.45	55.47
	中性洗涤纤维/%	30.52	30.54	30.42
	酸性洗涤纤维/%	18.54	18.54	18.25
	钙/%	0.75	0.75	0.75
	磷/%	0.42	0.42	0.42

注:每千克日粮的预混料成分包括高粱、鱼粉、骨粉、棉籽、米糠。

1.4.2 饲养管理

试验开始前,要对肉牛进行彻底地消毒。对试验肉牛进行健康体检、体内驱虫和免疫后进行编号。预试验期间,各组试验牛饲喂相同的饲粮。试验过程中,对试验肉牛的摄食、饮水、反刍、排泄和心理状态进行细致地观测和记录。试验肉牛按纯混料日粮方式饲养,每日无限制进食及饮水。

1.5 测定指标及方法

1.5.1 游离氨基酸的测定方法

参照 GB 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》方法进行改进^[21]。取0.5 g左右肉样置于10 mL离心管,离心管用胶带包裹底部。然后向离心管加入2.5 mL 8 wt.% 5-磺基水杨酸溶液。之后使用冷冻研磨机,4℃低温研磨60 s,2~3次。研磨完毕后用离心机4 000 r·min⁻¹,4℃离心10 min。再取上清1 mL加入250 μL正己烷静置分层。最后取下清液过0.22 mm水系滤膜二次入采样瓶。然后上机检测。

1.5.2 脂肪酸的测定方法

脂肪酸测定参照 GB5009.168-2016 方法进行改进^[22]。气相色谱条件:色谱柱:SP2560(100 m×0.25 mm×0.2 μm);载气流量:N₂ 1.0 mL·min⁻¹;进样口汽化温度:260℃;进样量(μL):1.0;分流比1:10;柱箱程序升温(℃):120℃(保持5 min)→3℃·min⁻¹→230℃(保持3 min)→1.5℃·min⁻¹→240℃(保持13 min);检测器FID:260℃;H₂:45.0 mL·min⁻¹,Air:450.0 mL·min⁻¹。

1.5.3 挥发性风味物质的测定方法

于萃取瓶中加入5 g室温解冻并粉碎肉样,向其中加入2 μL邻苯二氯苯,密封后置于55℃的水浴中保温30 min,将固相微萃取针插入样品瓶中顶空吸附30 min,于气相进样口250℃下解吸5 min后,取出SPME针管。使用GC-MS对挥发性风味物质进行检测。

色谱条件:参照亢其鹏等^[23]方法进行改进。DB-5MS毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm,0.25 μm);进样口温度250℃,进样方式为不分流,载气氦气(He),柱流速1 mL·min⁻¹,吹量3.0 mL·min⁻¹,分流比50:1;升温程序:起始温度40℃,保持10 min,以5℃·min⁻¹升至200℃,再以20℃·min⁻¹升至280℃,保持5 min。

质谱条件:电子轰击离子源,电离电压70 eV,传输线温度250℃,离子源温度250℃,质量扫描范围33~450 u。

1.6 统计分析

用 Excel 对试验数据进行整理，所有数据表示为平均值 ± 标准差，平均值采用 Duncan 氏法进行多重比较， $P<0.05$ 表示差异显著，数据显著性分析选用 SPSS 27.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 蒸汽压片玉米对牛肉游离氨基酸含量的影响

表 2 游离氨基酸含量			
Table 2 Changes of amino acid (mg/100 g)			
项目	试验 I 组	试验 II 组	对照组
天冬氨酸 (Asp)	0.72 ± 0.08 ^a	0.33 ± 0.10 ^b	—
谷氨酸 (Glu)	1.59 ± 0.04 ^a	1.56 ± 0.09 ^a	1.37 ± 0.14 ^b
鲜味氨基酸总量	2.31 ± 0.09 ^a	1.89 ± 0.13 ^a	1.37 ± 0.14 ^b
苏氨酸 (Thr)	9.67 ± 0.07 ^a	9.45 ± 0.12 ^a	9.00 ± 0.12 ^b
丝氨酸 (Ser)	7.12 ± 0.04 ^a	6.21 ± 0.13 ^b	6.18 ± 0.11 ^b
缬氨酸 (Val)	1.23 ± 0.13 ^a	1.32 ± 0.06 ^a	1.19 ± 0.01 ^a
甘氨酸 (Gly)	2.16 ± 0.12 ^b	2.48 ± 0.11 ^a	2.14 ± 0.11 ^b
丙氨酸 (Ala)	11.97 ± 0.09 ^b	12.57 ± 0.34 ^a	11.06 ± 0.21 ^c
赖氨酸 (Lys)	5.19 ± 0.06 ^a	5.23 ± 0.03 ^a	4.66 ± 0.13 ^b
甜味氨基酸总量	37.34 ± 0.22 ^a	37.26 ± 0.40 ^a	34.23 ± 0.31 ^b
半胱氨酸 (Cys)	0.80 ± 0.01 ^a	0.08 ± 0.01 ^a	0.07 ± 0.02 ^a
蛋氨酸 (Met)	0.51 ± 0.09 ^a	0.58 ± 0.10 ^a	0.46 ± 0.11 ^a
异亮氨酸 (Ile)	0.57 ± 0.07 ^a	0.65 ± 0.08 ^a	0.57 ± 0.16 ^a
亮氨酸 (Leu)	1.06 ± 0.13 ^a	1.17 ± 0.15 ^a	1.00 ± 0.05 ^a
酪氨酸 (Tyr)	0.59 ± 0.14 ^a	0.64 ± 0.06 ^a	0.56 ± 0.10 ^a
苯丙氨酸 (Phe)	0.71 ± 0.05 ^a	0.77 ± 0.13 ^a	0.64 ± 0.08 ^a
组氨酸 (His)	0.57 ± 0.05 ^a	0.61 ± 0.10 ^a	0.54 ± 0.09 ^a
精氨酸 (Arg)	0.69 ± 0.07 ^a	0.80 ± 0.09 ^a	0.63 ± 0.10 ^a
苦味氨基酸总量	5.50 ± 0.35 ^a	5.22 ± 0.42 ^a	4.47 ± 0.31 ^b
游离氨基酸总量 (FAA)	44.40 ± 0.10 ^a	43.49 ± 0.18 ^a	40.07 ± 0.32 ^b
必需氨基酸 (EAA)	18.41 ± 0.01 ^a	18.65 ± 0.20 ^a	17.07 ± 0.39 ^b

注：表中同行肩注不同小写英文字母表示差异显著 ($P<0.05$)，相同英文字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。表中“—”表示未检出。

牛肉滋味的呈味物质较为丰富，有甜、咸、酸、苦、鲜等，而牛肉各种滋味主要来自于氨基酸、核苷酸、有机酸和呈味肽等物质，其中氨基酸和核苷酸这两类在呈鲜方面起主导作用，或者以氨基酸等做为前体物质，形成其固有风味，例如鲜牛肉的游离氨基酸与宰后成熟过程中风味前体物质（如肌肽、鹅肌肽）的形成有着直接的关联，是风味形成的基础。Triki 等^[24]分

析了不同种类生鲜肉（牛肉、猪肉、羊肉、鸡肉和火鸡肉）的游离氨基酸组成，将其作为营养价值评价的核心指标。Roobab 等^[25]以鸡肉为研究对象，对脉冲电场作用下鸡胸中几种游离氨基酸与风味的关系进行分析，证明游离氨基酸是鸡肉风味形成的关键前体物质（如谷氨酸、丙氨酸等直接影响鲜味和甜味），其含量与肉的滋味品质密切相关。

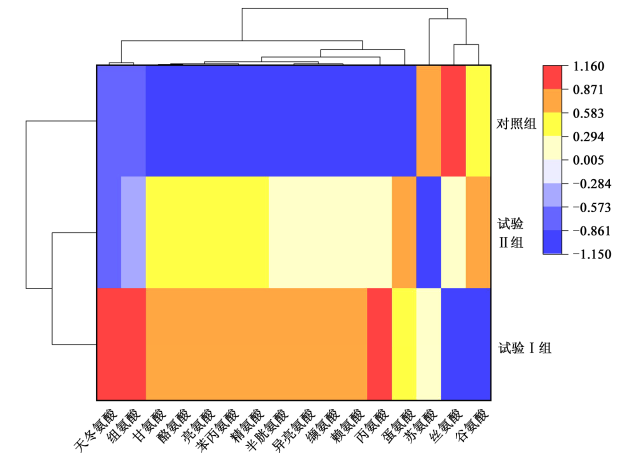


图 1 氨基酸含量聚类热图
Fig.1 Cluster heatmap of amino acid content

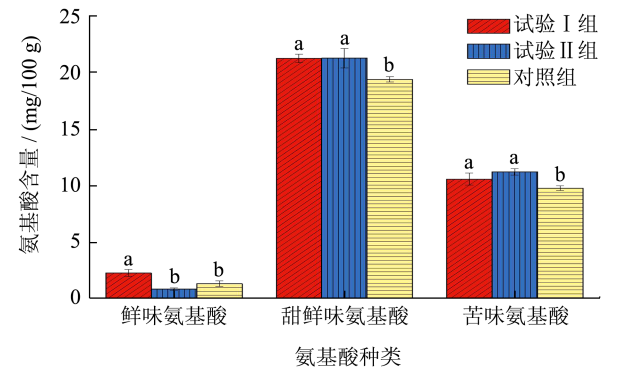


图 2 各类氨基酸总含量图
Fig.2 Content of various amino acids

注：图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

已有研究表明，饲喂不同日粮可以改变肉中的总游离氨基酸、必需氨基酸含量及鲜（甜）味氨基酸含量^[26]。根据表 2 及图 1 可知，用蒸汽压片玉米代替普通粉碎玉米作为日粮饲喂肉牛，试验组中游离氨基酸总含量、鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸含量整体明显优于对照组，差异显著 ($P<0.05$)，且随着日粮中蒸汽压片玉米的比例增加而增加。

由图 2 可知，游离氨基酸总量试验 I 组、试验 II 组分别比对照组高 10.81%、8.53%，其中鲜味氨基酸总量试验 I 组最高，比对照组高 68.61%。甜鲜味氨基酸总量试验 I 组、试验 II 组分别比对照组高 9.08%、

8.85%。鲜味氨基酸中天冬氨酸含量和谷氨酸含量试验组明显高于对照组，其中谷氨酸含量试验 I 组、试验 II 组分别比对照组高 16.05%、13.87%，谷氨酸和天冬氨酸是肉类食品中鲜味的主要来源。甜味氨基酸中丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸含量试验 I、试验 II 组均比对照组高，且差异显著 ($P<0.05$)。其中丝氨酸含量试验 I 组比对照组高达 15.31%，甘氨酸、丙氨酸含量试验 II 组比对照组高达 15.34% 和 13.63%。甘氨酸、丝氨酸、丙氨酸是肉类食品中甜味的主要来源。苦味氨基酸除赖氨酸外，试验组与对照组无明显差异 ($P>0.05$)。赖氨酸含量试验 I 组、试验 II 组分别比对照组组高 11.34%、13.23%。这说明饲喂蒸汽压片玉米的牛肉拥有更充足的鲜味及甜味，风味优于饲喂普通粉碎玉米的牛肉。原因可能是玉米在蒸汽压片过程中， γ - 玉米醇溶蛋白被破坏，使淀粉酶更易渗入淀粉

颗粒中，从而提高了淀粉降解的程度和速率，使更多的尿素循环至胃肠道中，不仅增加了乳腺对氨基酸和其他营养物质的摄入量，还促使约 40% 的血液尿素氮向肠道转移，进一步促进了肉牛对高质量微生物蛋白的吸收供应^[27]。

现有研究中与本试验内容一致的很少，相似的研究中王磊等^[28]利用蒸汽压片玉米和粉碎玉米饲喂肉仔鸡，评价了蒸汽压片玉米和粉碎玉米在氨基酸利用率上的差异。结果表明，在氨基酸真利用率方面，蒸汽压片玉米的丝氨酸、谷氨酸极显著高于粉碎玉米 ($P<0.01$)；天冬氨酸、赖氨酸、丙氨酸真利用率显著提高 ($P<0.05$)；而甘氨酸的利用率差异不显著 ($P>0.05$)，但是有升高趋势。但杨洋等^[29]报道能量高的饲料可以提高黑山羊肌肉非必需氨基酸含量，对必需氨基酸含量无显著影响。

表 3 脂肪酸含量 (mg/100 g)
Table 3 Table of fatty acid content

项目	试验 I 组	试验 II 组	对照组
C14:0 (肉豆蔻酸)	52.03 ± 0.25 ^a	37.94 ± 0.15 ^b	25.70 ± 0.15 ^c
C14:1 (肉豆蔻烯酸)	8.40 ± 0.43 ^a	6.52 ± 0.04 ^b	4.51 ± 0.15 ^c
C15:0 (十五烷酸)	6.10 ± 0.10 ^a	3.25 ± 0.12 ^b	1.53 ± 0.13 ^c
C16:0 (棕榈酸)	670.73 ± 4.51 ^a	529.03 ± 2.10 ^b	366.75 ± 3.51 ^c
C16:1 (棕榈油酸)	73.62 ± 2.05 ^a	58.67 ± 0.20 ^b	41.05 ± 3.51 ^c
C17:0 (十七烷酸)	20.54 ± 0.20 ^a	12.93 ± 0.11 ^b	8.92 ± 0.17 ^c
C17:1 (十七碳烯酸)	11.65 ± 0.06 ^a	9.43 ± 0.02 ^b	6.61 ± 0.24 ^c
C18:0 (硬脂酸)	429.34 ± 4.51 ^a	318.32 ± 1.53 ^b	205.04 ± 2.00 ^c
C18:1n9t (反油酸)	9.25 ± 0.15 ^a	—	5.94 ± 0.92 ^b
C18:1n9c (油酸)	930.50 ± 6.00 ^a	736.74 ± 3.51 ^b	505.33 ± 8.52 ^c
C18:2n6t (反式亚油酸)	1.64 ± 0.14	—	—
C18:2n6c (亚油酸)	162.40 ± 2.00 ^b	179.04 ± 1.00 ^a	131.74 ± 9.5 ^c
C20:0 (花生酸)	1.22 ± 0.11	—	—
C18:3n6 (γ - 亚麻酸)	—	—	7.03 ± 0.17
C18:3n3 (α - 亚麻酸)	8.45 ± 0.01 ^a	8.21 ± 0.03 ^a	5.40 ± 0.27 ^b
C21:0 (二十一烷酸)	3.51 ± 0.14	—	—
C20:2 (二十碳二烯酸)	—	—	7.23 ± 0.35
C20:3n6 (二十碳三烯酸)	12.11 ± 0.20 ^b	15.44 ± 0.15 ^a	8.72 ± 0.95 ^c
C20:4n6 (花生四烯酸)	67.63 ± 0.85 ^b	84.92 ± 1.10 ^a	60.44 ± 2.20 ^c
C22:6n3 (二十二碳六烯酸)	—	8.83 ± 0.58	—
SFA (饱和脂肪酸)	1 177.12 ± 1.19 ^a	901.23 ± 3.77 ^b	607.67 ± 5.71 ^c
MUFA (单不饱和脂肪酸)	1 024.44 ± 6.95 ^a	811.27 ± 3.76 ^b	563.47 ± 11.21 ^c
PUFA (多不饱和脂肪酸)	251.84 ± 0.70 ^b	296.35 ± 2.86 ^a	220.3 ± 2.4 ^c
TFA (总脂肪酸)	2 453.30 ± 7.96 ^a	20 08.82 ± 10.38 ^b	1 391.43 ± 8.32 ^c

注：表中同行肩注不同小写英文字母表示差异显著 ($P<0.05$)，相同英文字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。表中“—”表示未检出。

2.2 蒸汽压片玉米对牛肉脂肪酸含量的影响

从营养价值角度,摄入较多的饱和脂肪酸(SFA)会引发心脑血管疾病,不饱和脂肪酸(UFA)比饱和脂肪酸更易产生特有的香气,如肉香、脂香和花香、果香等风味物质,是肉类中风味的主要来源。单不饱和脂肪酸(MUFA)具有能降低机体内自由基脂质超氧化物、血糖与胆固醇以及血小板聚集率,调节血脂,强化氧化酶活性的作用^[30]。油酸(C18:1n9c)约占MUFA的85%以上,是MUFA中含量最多的脂肪酸,也是肉中含量较为突出的脂肪酸之一,对改善牛肉的风味有一定的作用,MUFA的生理功能也主要是以油酸来体现。多不饱和脂肪酸(PUFA)具有保护视力、降低胆固醇、调控基因的表达、抗肿瘤、防治心脏病等生理功能。二者对人体健康十分有益,对改善牛肉的风味有重要作用^[31]。

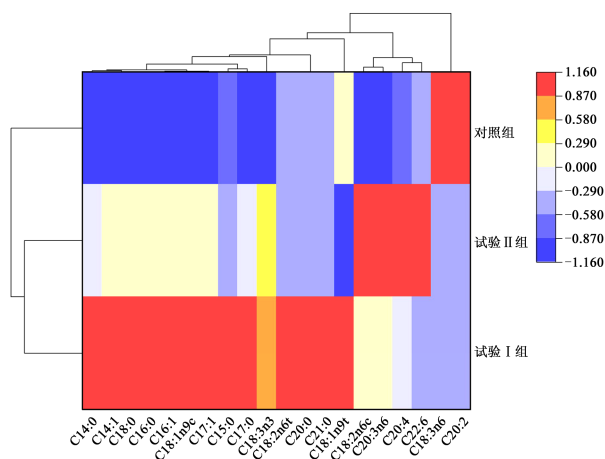


图3 脂肪酸含量聚类热图

Fig.3 Cluster heatmap of fatty acid content

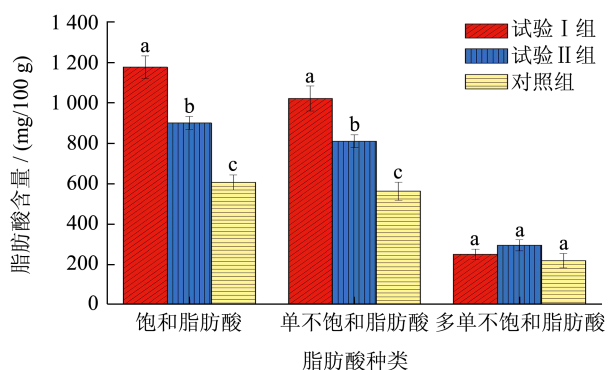


图4 各类脂肪酸含量图

Fig.4 Content of various fatty acids

注:图中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

由表3及图3、图4可知。在试验组I中,检出了17种脂肪酸,其中有7种不同的SFA、5种不同的MUFA和5种不同的PUFA。试验II组检出14种

不同的脂肪酸,其中有5种不同的SFA、4种不同的MUFA和5种不同的PUFA。对照组中检出了16种不同的脂肪酸,5种不同的SFA,5种不同的MUFA,6种不同的PUFA。

结果表明,用蒸汽压片玉米代替普通粉碎玉米作为日粮饲喂肉牛,牛肉中的总脂肪酸含量明显升高,并且随着日粮中蒸汽压片玉米的比例增加而增加,且差异显著($P < 0.05$)。脂肪酸总量试验I组、试验II组分别比对照组高76.30%、61.73%。其中SFA含量试验I组、试验II组分别比对照组高93.72%、48.36%;MUFA含量试验I组、试验II组分别比对照组高81.84%、44.04%,其中油酸的含量试验I组、试验II组分别比对照组高84.07%、45.88%;PUMA含量试验I组、试验II组分别比对照组高14.35%、34.52%。总脂肪酸含量提高,原因可能是与粉碎玉米相比,蒸汽压片处理后的玉米在瘤胃中的有效降解率和降解速率均得到了提高,显著提高了肉中肌肉脂肪含量。而饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸含量发生变化,可能是因为饲喂蒸汽压片玉米代替普通玉米的牛,其瘤胃的总VFA含量及瘤胃发酵的微生物菌群丰度得到了提升,虽然VFA主要是短链脂肪酸,而肌肉中的脂肪酸多为长链。两者可能没有直接的合成关系,但可能存在代谢上的间接影响,例如通过调节微生物的氢化作用、宿主的代谢途径或能量代谢状态进而影响脂肪酸的合成类型^[32,33]。

MUFA中棕榈油酸含量试验I组、试验II组分别比对照组高79.53%、42.92%;反油酸的含量试验I组比对照组高55.96%;油酸的含量试验I组、试验II组分别比对照组高84.07%、45.88%;PUMA中亚油酸的含量试验I组、试验II组分别比对照组高23.06%、35.95%,有研究表明油酸与亚油酸的比例高,则肉香风味就比较浓郁。并且只在试验I组中检测到了反式亚油酸,这说明饲喂蒸汽压片玉米的牛肉风味更丰富,优于饲喂普通粉碎玉米的牛肉。这可能归因于蒸汽压片玉米加工处理增加了牛肉机体的能量供应,因而影响牛肉肌肉内脂肪酸的组成。PUFA中与人体健康密切相关的功能性脂肪酸主要有n-3PUFAs和n-6PUFAs。本试验测到的n-6PUFAs有反式亚油酸(C18:2n6t)、亚油酸(C18:2n6c)、 γ -亚麻酸(C18:3n6)、二十碳三烯酸(C20:3n6)、花生四烯酸(C20:4n6)。n-3PUFAs有 α -亚麻酸(C18:3n3)和二十二碳六烯酸(C22:6n3)。n-6PUFAs及n-3PUFAs含量试验组均高于对照组,n-3PUFAs含量试验II组最高为93.13 mg/100 g,且差异显著($P < 0.05$)。由于n-3脂肪酸在大脑发育、视觉和免疫系统中起着重要作用,

营养学家通常建议摄入 n-6:n-3 PUFA 比例较低或 n-3 脂肪酸含量较高的食物。因此，蒸汽压片玉米饲喂可能改善牛肉中脂肪酸组成，产生对人体健康更有益的不饱和脂肪酸。Zhang 等^[34]对饲喂磨碎玉米和大豆、挤压玉米和大豆、蒸汽压片玉米和大豆的荷斯坦牛肉脂肪酸组成进行研究，得出饲喂蒸汽压片玉米和大豆牛肉中 PUFA 含量和 PUFA/SFA 比例最高，与本研究结论基本一致。Kazala 等^[35]研究表明随着日粮能量和蛋白质水平的提高，SFA 含量逐渐下降，而 PUMA 和 MUFA 含量逐渐上升。孔琳等^[36]提到，提高饲料利用率可以改善肉质品质，并且通过试验得出饲喂全价混合饲料的牛肉中棕榈酸和棕榈油酸含量显著增加，从

而改善了肉质。本研究中蒸汽压片玉米比例提高，饲料的利用率提高，因此牛肉的不饱和脂肪酸含量升高，改善牛肉的品质及风味。

2.3 蒸汽压片玉米对牛肉挥发性风味物质的影响

肉的风味是判断牛肉品质的重要标准，其中肉类的风味主要来自于肉类中的游离氨基酸、脂肪酸、小肽、肌苷酸和糖等风味物质，相关研究表明，挥发性风味物质产生在很大程度上依赖于脂肪酸组成，脂肪酸组成差异是产生不同挥发性风味物质的主要直接因素。日粮是影响肉类的挥发性风味物质的主要因素之一。

表 4 挥发性风味物质统计表
Table 4 Statistical table of volatile flavor substances

项目	保留时间 /min	相对含量/%			香味
		试验 I	试验 II	对照	
3-羟基-2-丁酮	6.03	7.64 ± 0.15 ^a	1.98 ± 0.27 ^c	3.08 ± 0.31 ^b	奶油香味、脂肪香味
己醛	8.57	8.85 ± 0.18 ^b	22.21 ± 0.52 ^a	21.32 ± 0.28 ^a	油脂、青草、苹果香味
2-庚酮	—	—	0.78 ± 0.11	—	水果香味、乳脂香味
庚醛	—	—	3.17 ± 0.13 ^a	3.20 ± 0.39 ^a	水果香味
1-庚醇	13.82	4.84 ± 0.17 ^a	4.43 ± 0.18 ^b	4.32 ± 0.23 ^b	酒香味、坚果香味
辛醛	14.5	6.37 ± 0.24 ^a	5.91 ± 0.16 ^b	5.43 ± 0.08 ^c	柑橘香味、清香味
(E)-2-辛烯醛	15.98	0.47 ± 0.11 ^b	1.00 ± 0.29 ^a	0.61 ± 0.18 ^{ab}	肉香味、黄瓜香味
壬醛	17.23	29.11 ± 0.07 ^a	19.77 ± 0.25 ^b	20.24 ± 0.37 ^b	油脂味
(E)-2-壬烯醛	18.6	0.44 ± 0.15 ^b	0.43 ± 0.16 ^b	0.75 ± 0.14 ^a	油脂味、玫瑰香味
1-壬醇	19.12	0.95 ± 0.07 ^a	0.47 ± 0.13 ^b	0.41 ± 0.11 ^b	玫瑰香味
癸醛	19.27	2.02 ± 0.12 ^a	1.30 ± 0.21 ^b	1.26 ± 0.15 ^b	甜橙香味、柠檬香味
(E)-2-癸烯醛	—	—	0.25 ± 0.04	—	禽类、橙子香味
十四烷	22.47	0.36 ± 0.13 ^a	0.6 ± 0.13 ^a	0.43 ± 0.09 ^a	—
十五烷	—	—	—	0.37 ± 0.11	—
十六烷	24.59	0.45 ± 0.15	—	—	—
十二醛	27.1	2.55 ± 0.14 ^a	1.93 ± 0.26 ^b	0.98 ± 0.33 ^c	油脂味、柑橘香味
反-2-十一烯醇	18.93	0.19 ± 0.09	—	—	油脂味、花香味、甜香
1-辛烯-3-醇	14.07	23.8 ± 0.61 ^b	26.37 ± 0.68 ^a	27.80 ± 0.52 ^a	蘑菇香味
1-戊醇	7.97	9.56 ± 0.28 ^a	5.28 ± 0.31 ^c	6.36 ± 0.23 ^b	面包香、酒香
反-2-辛烯-1-醇	16.46	2.42 ± 0.11 ^c	4.12 ± 0.25 ^a	3.43 ± 0.26 ^b	绿植香味
酮类	—	7.64 ± 0.15 ^a	2.76 ± 0.16 ^b	3.08 ± 0.31 ^b	
醛类	—	49.81 ± 0.21 ^c	55.97 ± 0.04 ^a	53.79 ± 0.16 ^b	
醇类	—	41.76 ± 0.35 ^a	40.67 ± 0.07 ^b	42.32 ± 0.73 ^a	
烃类	—	0.81 ± 0.28 ^a	0.60 ± 0.13 ^a	0.80 ± 0.25 ^a	

注：表中同行肩注不同小写英文字母表示差异显著（ $P<0.05$ ），相同英文字母表示差异不显著（ $P>0.05$ ）。表中“—”表示未检出。

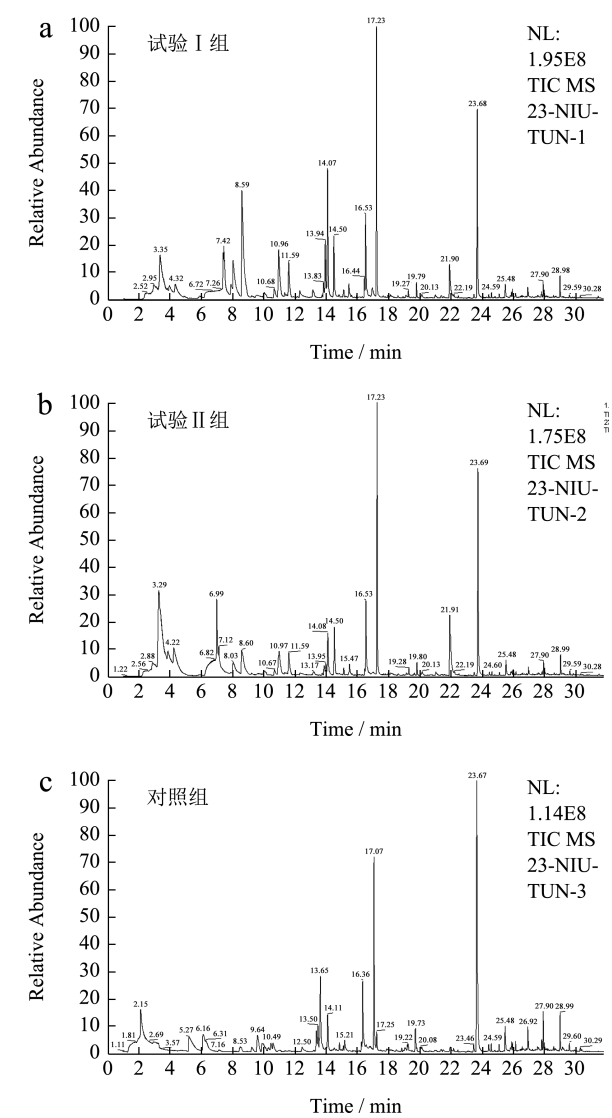


图 5 挥发性风味物质离子流图

Fig.5 The total ion current of volatile flavor compounds

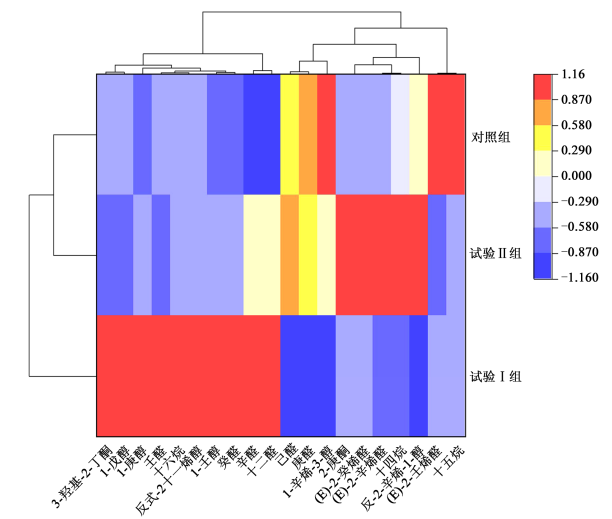


Fig.6 Cluster heatmap of the percentage of volatile flavor compounds

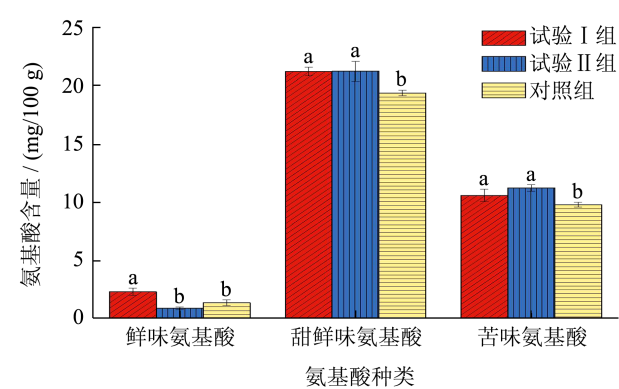


图 7 挥发性风味物质含量

Fig.7 Content of volatile flavor compounds

注：图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

由表 4 及图 5~7 可知，酮类、醛类、烃类、醇类在各组中的含量情况各不相同。其中酮类物质在试验 I 组中占比最高为 7.64%。酮类化合物是使肉类产生风味的主要因素之一，是脂质氧化的产物，呈奶油香或水果香。试验 I 组中总酮类物质及其中的 3-羟基-2-丁酮所占百分比显著高于另外两组 ($P<0.05$)。醛类物质大多具有油脂香味，醛类物质主要是 PUFA 氧化形成的产物，但是在试验组和对照组中其含量变化的趋势与 PUFA 并不完全一致，在所有醛类物质中，辛醛、十二醛，壬醛在试验 I 组中所占百分比显著高于另外两组，含量分别为 6.37%、2.55%、29.11% ($P<0.05$)，其中壬醛含量为 II 组的 1.47 倍，根据侯婷婷等^[37]研究发现辛醛和十二醛等可呈现令人愉快的香味，壬醛对风味贡献较大，说明日粮能量可能会影响肉中醛类化合物的含量。醇类挥发性风味物质大多来源于肉类脂肪的氧化分解，醇类物质在肉类香味中有着不可或缺的作用。试验 I 组、试验 II 组，对照组醇类挥发性物质存在显著差异 ($P<0.05$)，其中 1-庚醇、1-壬醇、1-戊醇在试验 I 组中所占百分比显著高于试验 II 组、对照组 ($P<0.05$)，且随着日粮中蒸汽压片玉米的比例增加而增加，并其只在试验 I 组中检测出具有油脂香和甜香的反-2-十一烯醇，烃类挥发性风味化合物占比都比较低，无显著差异 ($P>0.05$)。此部分与脂肪酸的研究结果趋势较一致，说明提高饲料中蒸汽压片玉米比例可能促进肉中单不饱和脂肪酸的沉积，并进一步分解为醛类、醇类等风味物质。原因可能是提高饲料中蒸汽压片玉米比例使肉中的脂肪含量提高，而内源脂酶可将肌肉中中性脂肪分解为短链挥发性脂肪酸、醛和醇等物质使肉制品形成特有风味。白云鹏等^[38]的研究也表明蒸汽压片玉米可以改善平凉红牛的肉色和风味。

3 结论

蒸汽压片玉米代替 TMR 饲料中的普通粉碎玉米饲喂西门塔尔肉牛, 对牛肉的风味物质影响较大。牛肉中游离氨基酸总含量、鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸整体含量明显提高, 差异显著 ($P < 0.05$), 尤其是鲜味氨基酸中天冬氨酸、谷氨酸以及甜味氨基酸中丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸含量明显高于饲喂普通粉碎玉米组。随着 TMR 饲料中蒸汽压片玉米比例提高, 牛肉中脂肪酸含量随之提高, 特别是对人体有益的单不饱和及多不饱和脂肪酸含量差异较大。牛肉中总酮类物质及醛类物质中的辛醛、十二醛、壬醛及醇类中的 1-庚醇、1-壬醇、1-戊醇等含量也出现了明显的提升。综上, 饲喂蒸汽压片玉米, 饲料的利用率提高, 牛肉拥有更充足的鲜味及甜味, 不饱和脂肪酸含量升高, 使其整体品质优于饲喂普通粉碎玉米的牛肉, 改善了牛肉的风味。本研究为减少饲料消耗等方面的研究奠定一定的理论依据, 对提高企业的经济效益具有重要意义。

参考文献

- [1] CHENG H L, JUNG E Y, SONG S, et al. Effect of freezing raw meat on the physicochemical characteristics of beef jerky [J]. Meat Science, 2023, 197: 109082.
- [2] 汪倩.燕麦麸猪肉丸的配方优化及烹饪、储藏和复热对其品质影响[D].杭州:浙江大学,2017.
- [3] SHI S, KONG B, WANG, Y et al. Comparison of the quality of beef jerky processed by traditional and modern drying methods from different districts in Inner Mongolia [J]. Meat Science, 2020, 163: 108080.
- [4] LED S H, KIM C N, KO K B, et al. Comparisons of beef fatty acid and amino acid characteristics between Jeju Black Cattle, Hanwoo, and Wagyu Breeds [J]. Food Science of Animal Resources, 2019, 39(3): e33.
- [5] 张莺莺,刁玉段,张佳杰,等.风味前体物质在肉类风味形成中的作用及其影响因素[J].上海畜牧兽医通讯,2024,4:1-9,89.
- [6] SHU Y, WU F, YANG W, et al. Dietary effect of curcumin on amino acid, fatty acid, and volatile compound profiles of chicken meat [J]. Foods, 2024, 13(14): 2230.
- [7] LI H S, CHEN J X, ZHANG Y X, et al. Evaluation of the flavor profiles of Yanbian-style sauced beef from differently treated raw beef samples [J]. Food Chemistry, 2024, 22: 101505.
- [8] HE P, LEI Y, ZHANG K, et al. Dietary oregano essential oil supplementation alters meat quality, oxidative stability, and fatty acid profiles of beef cattle [J]. Meat Science, 2023, 205: 109317.
- [9] SAENGSIK N, SANGSAWAD P, PAENGKOUM P, et al. Lipid and volatile profiles of various goat primal cuts: aspects of nutritional value and flavor/taste attributes [J]. Foods, 2024, 13(3): 492.
- [10] XU L, LIU C Y, LI S, et al. Association of lipidome evolution with the corresponding volatile characteristics of postmortem lamb during chilled storage [J]. Food Research International. 2023, 169: 112916.
- [11] 罗玉龙,赵丽华,王柏辉,等.苏尼特羊不同部位肌肉挥发性风味成分和脂肪酸分析[J].食品科学,2017,38(4):165-169.
- [12] MALEKKHAHI M, NASERIAN A A, RAHIMI A, et al. Effects of ground, steam-flaked, and super-conditioned corn grain on production performance and total-tract digestibility in dairy cows [J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(6): 6756-6767.
- [13] SAHIB N S, FATTAHNIA F, KAZEMI-BONCHENARI M, et al. Response of calves fed starters based on either steam-flaked corn grain or steam-flaked barley grain to dietary protein content in Holstein dairy calves [J]. Animal Feed Science and Technology, 2023, 306: 115795.
- [14] AKBARIAN A, CHAMANI M, SHAWRANG P, et al. Inflammatory genes expression and calf responses to different dietary grains (steam flaked corn vs steam-rolled barley) and protein sources (pelleted soybean meal vs pelleted canola meal) [J]. Animal Biotechnology, 2023, 22: 1-8.
- [15] LARSON H E, JADERBORG J P, PAULUS-COMPART D M, et al. Effect of substitution of distillers grains and glycerin for steam-flaked corn in finishing cattle diets on growth performance and carcass characteristics [J]. Journal of Animal Science, 2023, 101: skac348.
- [16] MONTANO M F, CARVALHO P H V, FERRAZ J, et al. Influence of level of dried distillers grains plus solubles substitution for steam-flaked corn on characteristics of growth performance, and dietary energetics of calf-fed Holstein steers during the initial 16-week growing phase: Metabolizable protein versus metabolizable amino acids [J]. Translational Animal Science, 2023, 7(1): txad024.
- [17] 崔翠,张俊奇,王学领,等.蒸汽压片玉米生产工艺及应用简述[J].粮食加工,2024,49(5):36-40.
- [18] BUTTREY E K, JENKINS K H, LEWIS JB, et al. Effects of 35% corn wet distillers grains plus solubles in steam-flaked and dry-rolled corn-based finishing diets on animal performance, carcass characteristics, beef fatty acid composition, and sensory attributes [J]. Journal of Animal Science, 2013, 91(4): 1850-1865.
- [19] SALAMI S A, O' GRADY M N, LUCIANO G, et al. Fatty acid composition, shelf-life and eating quality of beef from steers fed corn or wheat dried distillers' grains with solubles in a concentrate supplement to grass silage [J]. Meat Science, 2021, 173: 108381.
- [20] AREND F A, MURDOCH G K, DOUMIT M E C G E. Inclusion of grape pomace in finishing cattle diets: carcass traits, Meat Quality and Fatty Acid Composition animals [J]. Animals, 2022, 12(19): 2597.
- [21] GB 5009.124-2016,食品中氨基酸的测定[S].
- [22] GB 5009.168-2016,食品中脂肪酸的测定[S].
- [23] 亢其鹏,孙宝忠,韩玲,等.新疆地区三个肉牛品种各部位肉品质比较研究[J].食品与发酵科技,2019,55(2):6-13.
- [24] TRIKI M, HERRERO AM, JIMENEZ-COLMENERO F, et al. Quality assessment of fresh meat from several species based on free amino acid and biogenic amine contents during chilled storage [J]. Foods, 2018, 7(9): 132.
- [25] ROOBAB U, ZENG X A, AHMED W, et al. Effect of pulsed electric field on the chicken meat quality and taste-related amino acid stability: flavor simulation [J]. Foods, 2023, 12(4): 12040710.
- [26] 顿珠加才,廖阳慈,参木友,等.日粮能量水平对当雄牦牛肉品质

的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2023,6:127-132.

[27] THEURER C B, HUNTINGTON G B, HUBER JT, et al. Net absorption and utilization of nitrogenous compounds acrossruminal, intestinal, and hepatic tissues of growing beef steers fed dry-rolled or steam-flaked sorghum grainyl [J]. Journal of Animal Science, 2002, 80(2): 525-532.

[28] 王磊,刘凤菊,冯于明.蒸汽压片对玉米在肉仔鸡的养分生物学效价的影响[J].中国饲料,2011,5:9-13.

[29] 杨洋,王清峰,袁超,等.不同能量饲料对贵州黑山羊生长性能、屠宰性能、肉质性状、氨基酸及脂肪酸含量的影响[J].饲料研究,2024,47(7):1-6.

[30] 周景瑞,罗文菊,许浩翔,等.贵州省关岭牛不同部位牛肉挥发性风味物质和脂肪酸差异比较[J].湖北农业科学,2024,63(4):148-154.

[31] 张婧年,李升升,张艳,等.牦牛不同部位肉氨基酸和脂肪酸组成分析及营养评价[J].现代食品科技,2025,41(7):73-85.

[32] 杨敏,高雨,许子豪,等.饲喂蒸汽压片玉米对新疆褐牛增重、瘤胃发酵及微生物多样性的影响[J].中国畜牧兽医,2022,49(8): 2961-2970.

[33] LI Q S, WANG R, MA Z Y, et al. Dietary selection of metabolically distinct microorganisms drives hydrogen metabolism in ruminants [J]. ISME Journal, 2022, 16 (11): 2535-2546.

[34] ZHANG Y Q, HE D C, MEHG Q X, et al. Effect of steam-flaked corn and soybeans on muscle and intramuscular fatty acid composition in Holstein calves [J]. Journal of Animal Science, 2015, 93: 5812-5818.

[35] KAZALA E C, LOZEMAN F J, MIR P S, et al. Fatty acid composition of muscle fat and enzymes of storage lipid synthesis in whole muscle from beef cattle [J]. Lipids, 2006, 41(11): 1049-1057.

[36] 孔琳,严昌国.全价混合日粮对延边黄牛肉中脂肪酸和氨基酸含量的影响[J].中国畜牧杂志,2016,52(17):60-61.

[37] 侯婷婷,南京熙,林墨,等.延边黄牛肉挥发性风味物质[J].食品与机械,2018,34(8):45-47.

[38] 白云鹏,雷赵民,吴建平,等.蒸汽压片玉米对平凉红牛肉用性能的影响[J].动物营养学报,2020,32(6):2700-2709.