

吴天佑, 吴洁, 王文丹, 等. 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸对热应激奶牛生产性能、营养物质表观消化率及粪便菌群结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(8): 1566-1574.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.08.013

## 过瘤胃 $\gamma$ -氨基丁酸对热应激奶牛生产性能、营养物质表观消化率及粪便菌群结构的影响

吴天佑<sup>1,2</sup>, 吴洁<sup>1,2</sup>, 王文丹<sup>1,2</sup>, 韦子海<sup>1,2</sup>, 张幸怡<sup>1,2</sup>, 林森<sup>3</sup>, 苏衍菁<sup>1,2,3</sup>

(1.光明牧业有限公司, 上海 201103; 2.农业农村部南方奶牛遗传改良重点实验室, 上海 201103; 3.扬州大学动物科学与技术学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 为了探明在奶牛日粮中添加过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸对热应激奶牛生产性能、营养物质表观消化率以及粪便菌群结构的影响, 本研究于 2022 年 7-8 月在上海星火奶牛二场选取 10 头经产荷斯坦奶牛, 根据产奶量与泌乳天数均分为对照组和试验组。对照组奶牛饲喂牧场常规日粮, 试验组在常规日粮中每头奶牛每天添加 5 g 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸, 试验期共 48 d。结果显示, 与对照组相比, 试验组奶牛干物质采食量以及中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维表观消化率有增加的趋势 ( $0.05 \leq P < 0.10$ ); 试验组奶牛的产奶量显著提高 ( $P < 0.05$ ), 乳中尿素氮含量有下降的趋势 ( $0.05 \leq P < 0.10$ ); 试验组奶牛粪便微生物的丰富度未显著改变 ( $P > 0.05$ ), 但多样性显著增加 ( $P < 0.05$ ); 在门水平上拟杆菌门(Bacteroidetes)细菌、广古菌门(Euryarchaeota)细菌、盐杆菌门(Halobacterota)细菌的相对丰度显著增加 ( $P < 0.05$ ), 蓝藻菌门(Cyanobacteria)细菌的相对丰度显著降低 ( $P < 0.05$ ); 在属水平上克里斯滕森菌科\_R-7 群属(*Christensenellaceae\_R-7\_group*)细菌的相对丰度显著增加 ( $P < 0.05$ ), 理研菌科 RC9\_肠道群属(*Rikenellaceae\_RC9\_gut\_group*)细菌和双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)细菌相对丰度有增加的趋势 ( $0.05 \leq P < 0.10$ ), 而密螺旋体属(*Treponema*)细菌相对丰度具有降低的趋势 ( $0.05 \leq P < 0.10$ )。由此可见, 在奶牛日粮中添加适量过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸有助于提高热应激奶牛产奶量, 并改善肠道微生物群落结构。

**关键词:** 奶牛; 热应激; 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸; 生产性能; 消化率; 微生物多样性

**中图分类号:** S823.4<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)08-1566-09

## Effects of rumen-protected $\gamma$ -aminobutyric acid on production performance, apparent nutrient digestibility, and fecal microbiota structure of heat-stressed dairy cows

WU Tianyou<sup>1,2</sup>, WU Jie<sup>1,2</sup>, WANG Wendan<sup>1,2</sup>, WEI Zihai<sup>1,2</sup>, ZHANG Xingyi<sup>1,2</sup>, LIN Miao<sup>3</sup>, SU Yanjing<sup>1,2,3</sup>

(1. Bright Farming Co., Ltd., Shanghai 201103, China; 2. Key Laboratory of Southern Dairy Cow Genetic Improvement, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201103, China; 3. College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 上海奶牛绿色健康养殖关键技术研究与集成应用项目 [沪农科推字(2022)第 2-1 号]; 上海市科学技术委员会 2021 年度“科技创新行动计划”启明星项目 (21QB1400300)

作者简介: 吴天佑(1990-), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 主要从事饲料研发工作。(E-mail) 1253799450@qq.com

通讯作者: 苏衍菁, (E-mail) suyanjing@brightdairy.com

**Abstract:** To investigate the effects of adding rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid to the diet of dairy cows on the production performance, apparent digestibility of nutrients, and fecal microbiota structure of heat-stressed dairy cows, this study selected ten multiparous Holstein dairy cows at Shanghai Xinghuo No.2 Dairy Farm from July to August 2022. The cows were equally divided into a control group and an experimental group based on milk yield

and lactation days. Cows in the control group were fed the conventional diet of the farm, while those in the experimental group were fed the conventional diet supplemented with 5 g/d per head of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid, with a total experimental period of 48 days. The results showed that compared with the control group, the experimental group demonstrated a tendency toward increased dry matter intake and apparent digestibility of neutral detergent fiber and acid detergent fiber ( $0.05 \leq P < 0.10$ ). The milk yield of cows in the experimental group was significantly increased ( $P < 0.05$ ), and the milk urea nitrogen content tended to decrease ( $0.05 \leq P < 0.10$ ). The richness of fecal microorganisms in the experimental group did not change significantly ( $P > 0.05$ ), but the diversity was significantly increased ( $P < 0.05$ ). At the phylum level, the relative abundances of Bacteroidetes, Euryarchaeota, and Halobacterota were significantly increased ( $P < 0.05$ ), while the relative abundance of Cyanobacteria was significantly decreased ( $P < 0.05$ ). At the genus level, the relative abundance of *Christensenellaceae\_R-7\_group* was significantly increased ( $P < 0.05$ ); the relative abundances of *Rikenellaceae\_RC9\_gut\_group* and *Bifidobacterium* tended to increase ( $0.05 \leq P < 0.10$ ); and the relative abundance of *Treponema* tended to decrease ( $0.05 \leq P < 0.10$ ). It can be concluded that adding an appropriate amount of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid to the diet of dairy cows is beneficial for enhancing milk yield of heat-stressed dairy cows and improving the intestinal microbial community structure.

**Key words:** dairy cows; heat stress; rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid; production performance; digestibility; microbial diversity

奶牛对高温环境极为敏感,当牛舍的温度-湿度指数(*THI*) $>72$ 时,会表现出明显的热应激反应<sup>[1]</sup>,具体表现为呼吸急促、食欲减退、产奶量降低及牛奶品质下降等。同时,热应激还可能导致奶牛胃肠道菌群结构与代谢功能紊乱<sup>[2-4]</sup>,并影响其免疫功能<sup>[5-6]</sup>。在中国南方地区,夏季 *THI* 普遍高于 72,奶牛因此持续面临热应激的威胁。尽管采用风扇辅助喷淋的饲养模式能在一定程度上缓解这种不利环境的影响,但热应激仍是制约奶牛业发展的关键因素之一。因此,探索基于生理和代谢适应的营养策略,以增强奶牛对热应激的抵抗力显得尤为必要。 $\gamma$ -氨基丁酸(GABA)作为一种关键的抑制性中枢神经递质,在哺乳动物的生理过程中发挥着重要作用。近年来相关研究结果表明,GABA 不仅具有镇静、降血压和抗惊厥等作用,还能通过调节中枢神经系统与激素代谢来促进动物的采食行为,进而减轻热应激带来的负面效应<sup>[7-8]</sup>。在日粮中补充过瘤胃 GABA (RP-GABA)不仅能够改善热应激肉牛的营养物质消化率、生长性能及抗氧化能力<sup>[9]</sup>,也能改善热应激奶牛的免疫反应与抗氧化状态<sup>[10]</sup>。另有研究报告,外源 GABA 可通过调节肠道菌群结构,改善人体胃肠健康<sup>[11]</sup>和神经系统疾病<sup>[12]</sup>,并能缓解断奶仔猪的免疫应激<sup>[13-14]</sup>。然而,目前关于 GABA 对奶牛肠道微生物影响的报道仍较少,从肠道微生物角度阐释 GABA 抗热应激机制的研究尚属空白。本研究旨在探讨 RP-GABA 对热应激奶牛生产性能、

营养物质表观消化率及粪便菌群结构的影响,为揭示 GABA 缓解奶牛热应激的调控机制提供新的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计与饲养管理

本试验于 2022 年 7-8 月在上海星火奶牛二场开展,试验期间牛舍 *THI* 为 73.5~86.7(图 1),奶牛处于持续热应激状态。试验所有程序严格遵循扬州大学实验动物伦理委员会批准的方案执行,批准文号为 SYXK (Su) IACUC 2016-0019。本研究选择 10 头经产荷斯坦奶牛,产奶量为  $(55.39 \pm 3.45)$  kg,泌乳天数为  $(72.3 \pm 3.5)$  d,均分为对照组(CK)和试验组(S)两组,对照组饲喂牧场常规日粮(表 1),其中,1 kg 预混料中含维生素 A  $1.00 \times 10^6$  IU,维生素 D  $3.02 \times 10^5$  IU,维生素 E 4 650 mg,硫酸铁 3 040 mg,硫酸铜 3 605 mg,硫酸锰 4 680 mg,硫酸锌 15 800 mg,碘化钾 150 mg,六水合氯化钴 30 mg,亚硒酸钠 60 mg;试验组在常规日粮基础上每头奶牛每天添加 5 g RP-GABA(由光明牧业有限公司生产,GABA 有效含量 38.06%,12 h 过瘤胃率 84.64%,小肠释放率 97.46%)。试验期为 48 d,试验开始前先预试 5 d。奶牛拴系饲养,每天分别于 6:00、14:00、22:00 挤奶、投喂饲料,自由饮水。

### 1.2 测定指标及方法

1.2.1 干物质采食量 分别于试验初期和末期连

续 3 d, 记录每头奶牛每天的全价混合日粮 (TMR) 投喂量和剩余量。利用四分法采集 200 g TMR 和剩

余饲料样品, 在 105 °C 下烘干至恒重以测定干物质 (DM) 含量, 进而计算奶牛干物质采食量。

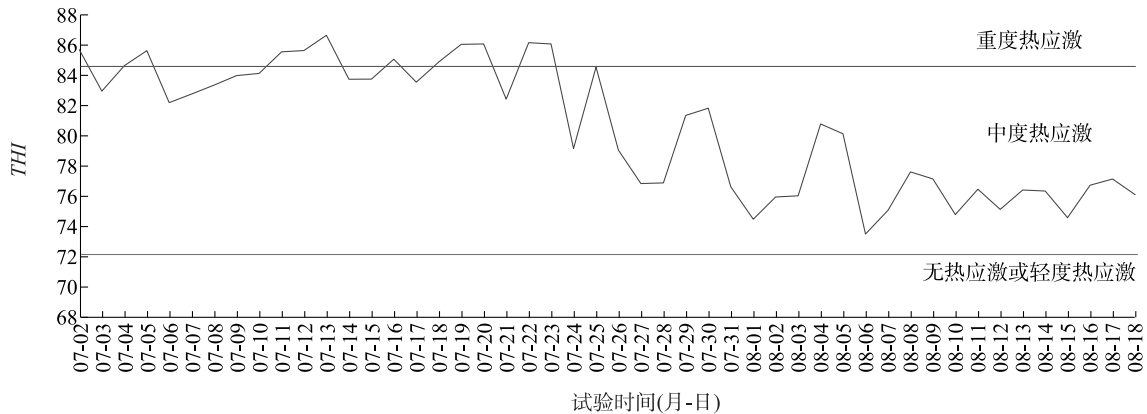


图 1 试验期牛舍温度-湿度指数 (THI)

Fig.1 The temperature-humidity index (THI) in the barn throughout the experimental period

表 1 常规日粮组成及营养水平

Table 1 Composition and nutritional levels of the conventional diet

饲料原料	含量	营养指标	含量
青贮玉米 (%)	21.27	泌乳净能 (MJ/kg)	7.33
苜蓿干草 (%)	9.15	粗蛋白质 (%)	17.02
燕麦草 (%)	4.58	粗灰分 (%)	4.52
玉米 (%)	18.13	中性洗涤纤维 (%)	26.64
压片玉米 (%)	9.15	酸性洗涤纤维 (%)	14.34
豆粕 (%)	10.15	钙 (%)	0.81
膨化豆粕 (%)	0.38	磷 (%)	0.42
双低菜粕 (%)	5.87		
甜菜粕 (%)	2.76		
啤酒糟 (%)	13.73		
棕榈酸脂肪粉 (%)	0.55		
脂肪酸钙 (%)	0.78		
氯化钠 (%)	0.49		
碳酸氢钠 (%)	0.43		
磷酸氢钙 (%)	0.43		
预混料 (%)	2.15		

泌乳净能依据 NRC (2001) 提供的方法计算, 其余指标为实测值。

1.2.2 营养物质表观消化率 分别于试验初期和末期连续 3 d 每天 14:00 通过直肠采集约 200 g 粪便样品, 将收集的粪便样品分成 2 份, 1 份加入 10% 的硫酸 10 mL 进行固氮, 用于粗蛋白 (CP) 等营养物质含量测定; 另 1 份迅速装于 10 mL 灭菌离心管中, 液氮冷冻保存, 用于后续微生物分析。参照《饲料中水分的测定》(GB/T 6435-2014) 检测 TMR 中水分, 进而

得到饲料中 DM 含量, 参照《饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法》(GB/T 6432-2018) 检测饲料中 CP 含量, 参照《饲料中中性洗涤纤维 (NDF) 的测定》(GB/T 20806-2006) 检测饲料中中性洗涤纤维含量, 参照《饲料中酸性洗涤纤维的测定》(NY/T 1459-2007) 检测饲料中酸性洗涤纤维含量, 参照《饲料中粗灰分的测定》(GB/T 6438-2007) 检测饲料中粗灰分含量, 参照《饲料中钙的测定》(GB/T 6436-2018) 检测饲料中钙含量, 参照《饲料中总磷的测定》(GB/T 6437-2018) 检测饲料中磷含量。参照 Lee 等<sup>[15]</sup> 的方法, 以酸不溶灰分 (AIA) 为内部标准计算营养物质表观消化率。  
1.2.3 产奶量及乳成分 分别于试验初期与末期连续 2 d 使用分流式计量器对每头奶牛的早、中、晚产奶量进行测定, 并依据 4 : 3 : 3 比例采集 50 mL 奶样 (采样管中提前放入 1 粒防腐剂, 采集间隔期间采样管置于 4 °C 条件下保存), 然后送至上海奶牛育种中心有限公司 DHI 检测实验室测定乳脂率、乳蛋白率、乳糖率、总固形物含量及尿素氮含量。并按以下公式计算 3.5% 乳脂矫正乳 (FCM) 产量和能量矫正乳 (ECM) 产量:

3.5% FCM 产量 = 0.432 3 × 产奶量 + 16.216 0 × 乳脂产量

ECM 产量 = 0.327 × 产奶量 + 12.950 × 乳脂产量 + 7.200 × 乳蛋白产量

1.2.4 肠道微生物区系 将上述未加 10% 硫酸的粪便样品送至广州基迪奥生物科技有限公司进行微生物分析。使用 HiPure Soil DNA 试剂盒 (广州美基生

物科技有限公司产品)提取微生物 DNA。按照 PCR 扩增程序对 16S *rRNA* 基因的 V3~V4 区域进行扩增(引物序列为 341 F:5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3' 和 806 R:5'-GGACTACHVGGGTATCTAAT-3')。使用 2% 琼脂糖凝胶回收产物,并利用 AxyPrep DNA 试剂盒[Axygen 生物技术(杭州)有限公司产品]进行纯化。随后在 StepOnePlus™ RT-PCR 系统(美国 Life Technologies 公司产品)上进行定量。将纯化后的扩增片段进行等量混合,然后在 Illumina 平台开展双端测序。使用 FASTP 软件对获得的原始数据进行过滤、拼接与质量控制,基于 UPARSE 算法<sup>[16]</sup>在 97% 相似度下对操作分类单元(OTU)进行聚类分析和物种注释。使用 QIIME 2 软件对粪便样品菌落结构进行  $\alpha$  多样性和  $\beta$  多样性分析。

### 1.3 统计分析

采用 IBM SPSS 25.0 统计软件的 GLM-ANCOVA 模块对试验数据进行协方差分析,其中试验前数据作为协变量。采用 Wilcoxon 秩和检验进行微生物

物种相对丰度等指标的差异性分析。通过 Chao1 指数和 Shannon 指数评估粪便样品中微生物群落的  $\alpha$  多样性,运用基于布雷柯蒂斯距离(Bray-Curtis)的主坐标分析(PCoA)结合多元方差分析(Adonis)评估  $\beta$  多样性。结果均以平均值  $\pm$  标准差表示,差异显著的判断标准为  $P < 0.05$ ,趋于显著的判断标准为  $0.05 \leq P < 0.10$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 过瘤胃 GABA 对热应激奶牛采食量和营养物质表观消化率的影响

如表 2 所示,热应激条件下,日粮中添加 RP-GABA 有提高奶牛干物质采食量的趋势( $0.05 \leq P < 0.10$ );中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维表观消化率也有增加的趋势( $0.05 \leq P < 0.10$ ),干物质、粗蛋白和灰分的表观消化率未达到统计学上的显著性水平( $P > 0.10$ )。

表 2 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸对热应激奶牛采食量和营养物质表观消化率的影响

Table 2 Effects of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid on feed intake and apparent digestibility of nutrients in heat-stressed dairy cows

指标	对照组	试验组	标准差	指标	P 值
干物质采食量(kg/d)	22.55	23.59	0.74	干物质采食量	0.072
干物质表观消化率(%)	81.03	83.58	1.11	干物质表观消化率	0.280
粗蛋白表观消化率(%)	80.42	83.11	1.23	粗蛋白表观消化率	0.307
中性洗涤纤维表观消化率(%)	65.63	72.32	1.99	中性洗涤纤维表观消化率	0.075
酸性洗涤纤维表观消化率(%)	64.14	70.85	1.92	酸性洗涤纤维表观消化率	0.077
灰分表观消化率(%)	69.96	74.25	1.42	灰分表观消化率	0.141

### 2.2 过瘤胃 GABA 对热应激奶牛产奶量和乳成分的影响

如表 3 所示,与对照组相比,试验组奶牛产奶量显著提高( $P < 0.05$ ),试验组乳尿素氮含量有降低的趋势( $0.05 \leq P < 0.10$ ),其余指标试验组与对照组差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.3 过瘤胃 GABA 对热应激奶牛粪便菌群结构的影响

2.3.1 测序数据和 OTU 分布 本次测序共得到初始序列 1 230 178 条,对照组样本和试验组样本对应的清晰序列分别为 599 826 条、607 100 条,清晰序列比例分别为 98.39%、97.87% (表 4),样本序列数以及质量符合后

续分析要求。通过过滤优化后,在 97% 相似度标准下聚类分析,发现对照组特有 OTU 592 个,试验组特有 OTU 612 个,两组共有 866 个 OTU (图 2)。

2.3.2 粪便菌落  $\alpha$  多样性 由表 5 可知,对照组与试验组之间 Chao1 指数无显著差异( $P > 0.05$ ),但试验组 Shannon 指数显著增加( $P < 0.05$ ),说明添加 RP-GABA 未改变热应激奶牛粪便微生物的丰富度,但可增加微生物的多样性。

2.3.3 粪便菌落  $\beta$  多样性 如图 3 所示,两组粪便微生物的结构组成存在显著差异( $R^2 = 0.202$ ,  $P = 0.036$ ),其中第 1 主成分和第 2 主成分分别能解释微生物差异的 31.51% 和 24.30%。

表 3 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸对热应激奶牛产奶量和乳成分的影响

Table 3 Effects of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid on milk yield and milk composition in heat-stressed dairy cows

指标	对照组	试验组	标准差	指标	P 值
产奶量 (kg/d)	47.84	49.86	1.05	产奶量	0.032
3.5%乳脂校正乳产量 (kg/d)	47.94	47.31	1.12	3.5%乳脂校正乳产量	0.382
能量校正乳产量 (kg/d)	48.39	48.57	1.19	能量校正乳产量	0.319
乳脂产量 (kg/d)	1.73	1.65	0.10	乳脂产量	0.301
乳蛋白产量 (kg/d)	1.44	1.51	0.10	乳蛋白产量	0.227
乳糖产量 (kg/d)	2.56	2.55	0.25	乳糖产量	0.911
总固体产量 (kg/d)	6.08	5.99	0.45	总固体产量	0.685
乳脂率 (%)	3.65	3.32	0.38	乳脂率	0.483
乳蛋白率 (%)	3.02	3.03	0.16	乳蛋白率	0.654
乳糖率 (%)	5.35	5.11	0.18	乳糖率	0.495
总固体率 (%)	12.78	12.05	0.73	总固体率	0.391
尿素氮含量 (mg/dL)	14.53	14.16	1.78	尿素氮含量	0.076

表 4 测序数据和 OTU 分布

Table 4 Sequencing data and OTU distribution

处理	初始序列 (条)	清晰序列 (条)	清晰序列比例 (%)	OTU 数量 (个)
对照组	609 844	599 826	98.39	1 458
试验组	620 334	607 100	97.87	1 478

OTU:操作分类单元。

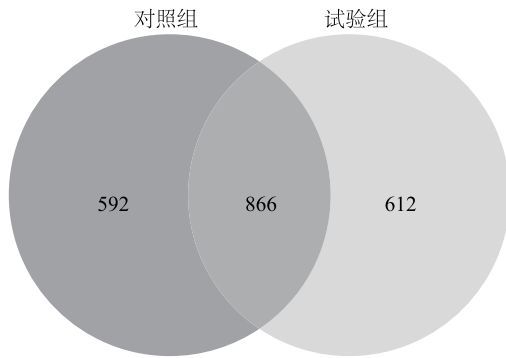


图 2 OTU 分布韦恩图

Fig.2 Venn diagram of OTU distribution

表 5 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸对热应激奶牛粪便菌落  $\alpha$  多样性的影响

Table 5 Effects of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid on the  $\alpha$ -diversity of fecal microbial communities in heat-stressed dairy cows

指标	对照组	试验组	标准差	P 值
Chao1 指数	1 752.90	1 808.56	76.15	0.303
Shannon 指数	7.13	7.40	0.14	0.015

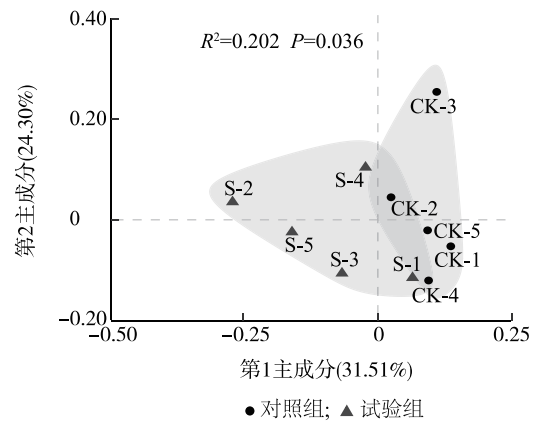


图 3 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸对肠道微生物影响的 PCoA 分析

Fig.3 PCoA analysis of the effects of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid on intestinal microorganisms

2.3.4 粪便微生物组成 对门水平相对丰度前 10 位的微生物进行差异分析,结果如表 6 所示,门水平上以厚壁菌门 (Firmicutes) 与拟杆菌门 (Bacteroidetes) 为主导菌门,占比超过 85.00%。试验组拟杆菌门 (Bacteroidetes) 细菌、广古菌门 (Euryarchaeota) 细菌、盐杆菌门 (Halobacterota) 细菌的相对丰度较对照组显著增加 ( $P < 0.05$ ),放线菌门 (Actinobacteriota) 细菌、髌骨细菌门 (Patescibacteria) 细菌有增加的趋势 ( $0.05 \leq P < 0.10$ );蓝藻菌门 (Cyanobacteria) 细菌相对丰度显著降低 ( $P < 0.05$ ),螺旋体门 (Spirochaetes) 细菌有降低的趋势 ( $P = 0.052$ )。对

属水平相对丰度前 10 位的微生物进行差异分析,结果如表 7 所示,属水平上以瘤胃菌科 UCG-005 属 (*Ruminococcaceae*-UCG-005) 为最优势菌属。与对照组相比,试验组克里斯滕森菌科\_R-7 群属 (*Christensenellaceae*\_R-7\_group) 的相对丰度显著提高 ( $P <$

0.05), 理研菌科 RC9\_肠道群属 (*Rikenellaceae*\_RC9\_gut\_group) 和双歧杆菌属 (*Bifidobacterium*) 相对丰度有增加趋势 ( $0.05 \leq P < 0.10$ ), 密螺旋体属 (*Treponema*) 相对丰度有下降趋势 ( $0.05 \leq P < 0.10$ )。

表 6 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸处理热应激奶牛粪便菌群相对丰度排名前 10 的门

Table 6 Top 10 phyla in relative abundance of fecal microbiota from heat-stressed dairy cows treated with rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid

菌门名称	对照组菌群相对丰度	试验组菌群相对丰度	标准差	P 值
厚壁菌门(Firmicutes)	60.50	55.94	3.46	0.471
拟杆菌门(Bacteroidetes)	30.22	31.02	2.76	0.006
放线菌门(Actinobacteriota)	2.75	5.82	2.09	0.083
螺旋体门(Spirochaetes)	2.73	2.30	1.71	0.052
广古菌门(Euryarchaeota)	0.35	0.98	0.20	0.013
变形菌门(Proteobacteria)	0.97	0.87	0.48	0.460
骸骨细菌门(Patescibacteria)	0.24	0.36	0.12	0.061
疣微菌门(Verrucomicrobiota)	0.23	0.26	0.15	0.462
盐杆菌门(Halobacterota)	<0.01	0.37	0.29	0.031
蓝藻菌门(Cyanobacteria)	0.04	0.02	0.02	0.021

表 7 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸处理热应激奶牛粪便菌群相对丰度排名前 10 的菌属

Table 7 Top 10 genera in relative abundance of fecal microbiota from heat-stressed dairy cows treated with rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid

菌属名称	对照组菌群相对丰度	试验组菌群相对丰度	标准差	P 值
瘤胃菌科 UCG-005 属 ( <i>Ruminococcaceae</i> -UCG-005)	20.70	16.94	2.54	0.628
理研菌科 RC9_肠道群属 ( <i>Rikenellaceae</i> _RC9_gut_group)	7.04	9.34	1.78	0.097
拟杆菌属 ( <i>Bacteroides</i> )	7.72	6.13	0.96	0.597
双歧杆菌属 ( <i>Bifidobacterium</i> )	2.50	5.53	2.11	0.080
普雷沃氏菌科 UCG-003 属 ( <i>Prevotellaceae</i> _UCG-003)	4.97	3.42	2.42	0.111
克里斯滕森菌科_R-7_群属 ( <i>Christensenellaceae</i> _R-7_group)	3.17	3.85	0.27	0.037
罗姆布茨菌属 ( <i>Romboutsia</i> )	2.52	2.78	0.78	0.922
密螺旋体属 ( <i>Treponema</i> )	2.72	2.30	1.71	0.053
另枝菌属 ( <i>Alistipes</i> )	1.78	1.64	0.21	0.289
莫拉菌属 ( <i>Moraxella</i> )	1.35	1.18	0.35	0.240

### 3 讨论

#### 3.1 过瘤胃 GABA 对热应激奶牛采食量和营养物质表观消化率的影响

在夏季持续高温期,为降低代谢产热,奶牛胃肠蠕动减慢,食糜胃内停留时间延长,胃壁紧张度增

加,进而激活下丘脑厌食中枢,抑制采食<sup>[17-18]</sup>。本试验结果显示,饲料中添加 RP-GABA 具有增加热应激奶牛采食量的作用,与前人的研究结果相一致,Cheng 等<sup>[19]</sup>研究发现,给热应激奶牛补充不同质量浓度 RP-GABA 后,奶牛干物质摄入量随 GABA 质量浓度的增加呈线性增长趋势;Wang 等<sup>[20]</sup>研究发

现,给泌乳早期奶牛(未说明是否处于热应激状态)每天补充0.8~2.4 g RP-GABA 可显著增加奶牛干物质采食量。此外,前人研究还发现,RP-GABA 可抑制饱腹感激素(如胆囊收缩素等)分泌、协同增强促进食欲的神经肽 Y 的表达<sup>[21-23]</sup>,本试验在热应激奶牛饲料中添加 RP-GABA 后奶牛采食量增加可能与此相关。

热应激奶牛为加强散热会增加流经皮肤的血流量,从而导致消化道血流量减少,营养物质消化吸收速率减缓<sup>[24-25]</sup>。持续的热应激还会引起奶牛代谢紊乱、消化不良,导致饲料利用率降低<sup>[26]</sup>。而 GABA 能够提升动物胃肠道对理化刺激的敏感性,增强相关消化酶的活性,促进奶牛对营养物质的消化吸收<sup>[19,27]</sup>。本试验发现,饲料中添加 RP-GABA 有增加奶牛对中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维表观消化率的趋势( $0.05 \leq P < 0.10$ ),但对于干物质和粗蛋白的表观消化率无显著影响( $P > 0.05$ )。Guo 等<sup>[9]</sup>在热应激肉牛日粮中按 1 kg 体重添加 0 mg RP-GABA(对照)、8 mg RP-GABA、16 mg RP-GABA、24 mg RP-GABA 和 32 mg RP-GABA,试验持续 45 d 后发现,1 kg 体重添加 16 mg RP-GABA 可显著提高肉牛对干物质、粗蛋白、粗纤维和钙的表观消化率,磷的表观消化率也有增加的趋势;然而 Cheng 等<sup>[19]</sup>研究发现,热应激奶牛对干物质、粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的表观消化率不受 GABA 补充剂的影响,以上研究结果的不一致可能与动物品种、试验环境和 RP-GABA 添加剂量有关。

### 3.2 过瘤胃 GABA 对热应激奶牛产奶量和乳成分的影响

产奶量降低是热应激奶牛最明显的特征。本试验结果显示,与对照组相比,试验组奶牛补充 RP-GABA 后产奶量显著增加( $P < 0.05$ ),这与前人的研究结果<sup>[20]</sup>一致。产奶量的增加可能是因为补充 RP-GABA 后奶牛采食量增加、纤维等营养物质消化率提高;研究还发现,RP-GABA 能够提高热应激奶牛的抗氧化能力,降低氧化应激<sup>[28]</sup>,这也可能对产奶量产生积极影响。值得注意的是,本研究中 3.5% 乳脂矫正乳产量和能量矫正乳产量并未因添加 RP-GABA 而显著增加或降低,这主要是因为乳脂率及其产量出现一定程度的降低(未达到统计学水平)。尽管乳蛋白产量的增加也未达到统计学水平,但乳中尿素氮的含量有降低的趋势( $0.05 \leq P < 0.10$ ),表

明 RP-GABA 具有提高热应激奶牛机体蛋白质代谢(或氮代谢)的潜力。Cheng 等<sup>[19]</sup>研究发现,RP-GABA 提高了热应激奶牛乳蛋白率及乳蛋白产量,据此推测 GABA 可以增加氨基酸供应,进而影响乳蛋白合成;Chen 等<sup>[13]</sup>通过研究发现,GABA 可增强仔猪肠黏膜对天然氨基酸的吸收,同时降低血清中大多数天然氨基酸水平,由此可知,GABA 可能在促进氨基酸的吸收和消耗方面发挥作用。

### 3.3 过瘤胃 GABA 对热应激奶牛粪便菌群结构的影响

胃肠道菌群在奶牛免疫防御、代谢过程和整体健康中扮演着重要角色。热应激已被证实会改变奶牛瘤胃<sup>[29-30]</sup>和肠道<sup>[31-33]</sup>菌群多样性和结构。相关研究结果显示,GABA 在人体与肠道菌群间存在双向调节关系,即 GABA 可通过调节肠道菌群发挥维持机体胃肠健康的功能,同时肠道中某些细菌(尤其是拟杆菌属细菌)也能够产生 GABA 来调节机体<sup>[12,34-35]</sup>。但目前尚未有关于 GABA 对奶牛胃肠道菌群影响的报道。本试验结果表明,在热应激条件下饲料中添加 RP-GABA 不会显著改变奶牛后肠道(粪便)微生物的丰富度( $P > 0.05$ ),但可显著增加其多样性( $P < 0.05$ ),并改变菌群结构。

进一步研究发现,RP-GABA 可显著增加肠道中拟杆菌门(Bacteroidetes)细菌、广古菌门(Euryarchaeota)细菌的相对丰度( $P < 0.05$ ),并倾向于增加放线菌门(Actinobacteriota)细菌的相对丰度( $0.05 \leq P < 0.10$ )。研究结果证实,拟杆菌门细菌在营养吸收、能量代谢中发挥关键作用,并参与免疫调节及肠-脑轴的调节<sup>[36]</sup>;广古菌门细菌产生的短链脂肪酸对肠道健康和宿主代谢至关重要<sup>[37]</sup>;放线菌门细菌是已知抗生素的重要来源<sup>[38]</sup>。由此可知,添加 RP-GABA 有助于改善热应激奶牛的营养物质吸收效率和免疫功能。

据报道,克里斯滕森菌科\_R-7 群属(*Christensenellaceae\_R-7\_group*)细菌具有降解饲料蛋白质和纤维的功能,促进营养物质吸收<sup>[39]</sup>;理研菌科 RC9\_肠道群属(*Rikenellaceae\_RC9\_gut\_group*)细菌可有效降解可溶性多糖和不溶性纤维素,并改善机体脂质代谢<sup>[40-41]</sup>;双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)细菌可通过产生短链脂肪酸等代谢产物降低肠道 pH 值,进而提高矿物质等营养物质的生物利用率<sup>[42-43]</sup>。本试验结果进一步证实,添加 RP-GABA

有助于提高热应激奶牛后肠道营养物质消化率,也在一定程度上解释了试验组奶牛对中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维表观消化率增加的原因。此外,理研菌科 RC9\_肠道群属细菌、双歧杆菌属细菌还具有提高机体免疫力和抗氧化活性的功能,其丰度与炎症呈显著负相关<sup>[44-45]</sup>,这也说明 RP-GABA 可能在维持热应激奶牛免疫调节方面同样发挥重要作用。与此类似,Chen 等<sup>[13]</sup>研究发现,仔猪补充 GABA 可通过抑制促炎因子基因的表达来调节肠道免疫。密螺旋体属 (*Treponema*) 细菌可分为致病性和非致病性两类,非致病性细菌涉及木质纤维素降解,致病性细菌可能会威胁奶牛健康。本试验发现,RP-GABA 倾向于降低热应激奶牛肠道密螺旋体属细菌的相对丰度,其具体调节作用有待进一步研究。

## 4 结论

本研究通过在热应激奶牛饲料中每天每头牛添加 5 g 过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸,结果发现,与未添加过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸的对照组相比,试验组奶牛产奶量显著提升,干物质采食量有提高趋势,乳品质量未受影响,同时改善了奶牛肠道微生物群落结构。本研究结果为揭示过瘤胃  $\gamma$ -氨基丁酸可有效缓解奶牛热应激提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] DIMOV D, PENEV T, MARINOV I. Temperature-humidity index-an indicator for prediction of heat stress in dairy cows[J]. Veterinarija ir Zootechnika, 2020, 78(100):10-15.
- [2] 陈少侃,罗汉鹏,张国兴,等. 热应激条件下荷斯坦奶牛后段肠道差异微生物分析[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46(8):2273-2280.
- [3] CZECH B, WANG Y C, WANG K, et al. Host transcriptome and microbiome interactions in Holstein cattle under heat stress condition[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13:998093.
- [4] 郑洁怡,杨舒黎,赵开玲,等. 热应激对反刍动物瘤胃功能及潜在耐热标志物的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2024, 51(3):1041-1049.
- [5] WEN C Y, WEI S Y, ZONG X, et al. Microbiota-gut-brain axis and nutritional strategy under heat stress[J]. Animal Nutrition, 2021, 7(4):1329-1336.
- [6] KIM H, JO J H, LEE H G, et al. Inflammatory response in dairy cows caused by heat stress and biological mechanisms for maintaining homeostasis[J]. PLoS One, 2024, 19(3):0300719.
- [7] ARNESON A G, STEWART J W, BYRD M H, et al. Plasma  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) concentrations in lactating Holstein cows during thermoneutral and heat stress conditions and their relationships with circulating glucose, insulin and progesterone levels[J]. Veterinary Sciences, 2024, 11(3):137.
- [8] 刘平,赵珊珊,普金徽,等.  $\gamma$ -氨基丁酸的生物学功能及其在奶牛生产中的应用研究进展[J]. 饲料研究, 2023, 46(15):137-141.
- [9] GUO K, CAO H B, ZHU Y J, et al. Improving effects of dietary rumen protected  $\gamma$ -aminobutyric acid additive on apparent nutrient digestibility, growth performance and health status in heat-stressed beef cattle[J]. Animal Science Journal, 2018, 89(9):1280-1286.
- [10] CHENG J B, ZHENG N, SUN X Z, et al. Feeding rumen-protected gamma-aminobutyric acid enhances the immune response and antioxidant status of heat-stressed lactating dairy cows[J]. Journal of Thermal Biology, 2016, 60:103-108.
- [11] QUILLIN S J, TRAN P, PRINDLE A. Potential roles for gamma-aminobutyric acid signaling in bacterial communities[J]. Bioelectricity, 2021, 3(2):120-125.
- [12] 何维,宋贺,扬子彪,等. 外源  $\gamma$ -氨基丁酸通过调节肠道菌群改善神经系统疾病研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6):432-440.
- [13] CHEN S, TAN B, XIA Y Y, et al. Effects of dietary gamma-aminobutyric acid supplementation on the intestinal functions in weaning piglets[J]. Food & Function, 2019, 10(1):366-378.
- [14] ZHAO Y Y, WANG J, WANG H, et al. Effects of GABA supplementation on intestinal *SfgA* secretion and gut microbiota in the healthy and ETEC-infected weaning piglets[J]. Mediators of Inflammation, 2020, 2020:7368483.
- [15] LEE C, HRISTOV A N. Short communication: evaluation of acid-insoluble ash and indigestible neutral detergent fiber as total-tract digestibility markers in dairy cows fed corn silage-based diets[J]. Journal of Dairy Science, 2013, 96(8):5295-5299.
- [16] EDGAR R C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. Nature Methods, 2013, 10(10):996-998.
- [17] SULLIVAN K F, MADER T L. Managing heat stress episodes in confined cattle[J]. The Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice, 2018, 34(2):325-339.
- [18] 王哲奇,徐元庆,石璐璐,等. 热应激对反刍动物采食和瘤胃功能的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(8):3448-3455.
- [19] CHENG J B, BU D P, WANG J Q, et al. Effects of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid on performance and nutrient digestibility in heat-stressed dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(9):5599-5607.
- [20] WANG D M, WANG C, LIU H Y, et al. Effects of rumen-protected  $\gamma$ -aminobutyric acid on feed intake, lactation performance, and antioxidative status in early lactating dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2013, 96(5):3222-3227.
- [21] LI S R, LIU M Q, HAN Y, et al. Gut microbiota-derived gamma-aminobutyric acid improves host appetite by inhibiting satiety hormone secretion[J]. MSystems, 2024, 9(10):0101524.

- [22] KUMAR M, GUPTA G, VARGHESE T. Effect of dietary gamma-aminobutyric acid on growth performance, haemato-immunological responses, antioxidant enzymes activity, ghrelin and IGF-I expression of *Labeo rohita* (Hamilton, 1822) fingerlings[J]. Comparative Clinical Pathology, 2023, 32(1):53-65.
- [23] 施忠秋, 齐智利.  $\gamma$ -氨基丁酸调控采食量和缓解热应激的机制[J]. 动物营养学报, 2014, 26(1):49-53.
- [24] MISHRA M, MARTZ F A, STANLEY R W, et al. Effect of diet and ambient temperature-humidity on ruminal pH, oxidation reduction potential, ammonia and lactic acid in lactating cows[J]. Journal of Animal Science, 1970, 30(6):1023-1028.
- [25] BERNABUCCI U, LACETERA N, DANIELI P P, et al. 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.
- [26] COLLIER R J, BEEDE D K, THATCHER W W, et al. Influences of environment and its modification on dairy animal health and production[J]. Journal of Dairy Science, 1982, 65(11):2213-2227.
- [27] CHEN Z, XIE J, WANG B, et al. Effect of  $\gamma$ -aminobutyric acid on digestive enzymes, absorption function, and immune function of intestinal mucosa in heat-stressed chicken[J]. Poultry Science, 2014, 93(10):2490-2500.
- [28] SU Y J, CHENG Z Q, LIU W, et al. Effects of rumen-protective  $\gamma$ -aminobutyric acid additive on lactation performance and serum biochemistry in heat-stressed cows[J]. Frontiers in Veterinary Science, 2023, 10:1228155.
- [29] PARK T, MA L, GAO S T, et al. Heat stress impacts the multi-domain ruminal microbiota and some of the functional features independent of its effect on feed intake in lactating dairy cows[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2022, 13(1):71.
- [30] ZHAO S G, MIN L, ZHENG N, et al. Effect of heat stress on bacterial composition and metabolism in the rumen of lactating dairy cows[J]. Animals, 2019, 9(11):925.
- [31] KOCH F, REYER H, GÖRS S, et al. Heat stress and feeding effects on the mucosa-associated and digesta microbiome and their relationship to plasma and digesta fluid metabolites in the jejunum of dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(7):5162-5177.
- [32] YU Z, CANTET J M, PAZ H A, et al. Heat stress-associated changes in the intestinal barrier, inflammatory signals, and microbiome communities in dairy calves[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(2):1175-1196.
- [33] LI H, LI R, CHEN H J, et al. Effect of different seasons (spring vs summer) on the microbiota diversity in the feces of dairy cows[J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 64(3):345-354.
- [34] OTARU N, YE K, MUJEZINOVIC D, et al. GABA production by human intestinal *Bacteroides* spp.: prevalence, regulation, and role in acid stress tolerance[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12:656895.
- [35] STRANDWITZ P, KIM K H, TEREKHOVA D, et al. GABA-modulating bacteria of the human gut microbiota[J]. Nature Microbiology, 2019, 4(3):396-403.
- [36] GIBIINO G, LOPETUSO L R, SCALDAFERRI F, et al. Exploring *Bacteroidetes*: metabolic key points and immunological tricks of our gut commensals[J]. Digestive and Liver Disease, 2018, 50(7):635-639.
- [37] BAKER B J, DE ANDA V, SEITZ K W, et al. Diversity, ecology and evolution of *Archaea*[J]. Nature Microbiology, 2020, 5(7):887-900.
- [38] KYAW T S, ZHANG C, SANDY M, et al. Human gut *Actinobacteria* boost drug absorption by secreting P-glycoprotein ATPase inhibitors[J]. iScience, 2024, 27(6):110122.
- [39] WANG X W, GUO C, XU X F, et al. Effect of alkaline mineral complex buffer supplementation on rumen fermentation, rumen microbiota and rumen epithelial transcriptome of newborn calves[J]. Fermentation, 2023, 9(11):973.
- [40] 王威皓, 段艳, 王宏迪, 等. 饲养方式对苏尼特羊生长性能、屠宰性能、肉品质和瘤胃菌群的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54(3):1085-1094.
- [41] HUANG J Z, SHENG Y Y, XUE P F, et al. Characteristics of bacterial community and volatile fatty acids in the gastrointestinal tract of Tarim wapiti[J]. Italian Journal of Animal Science, 2024, 23(1):259-274.
- [42] MARTIN A J M, SEREBRINSKY-DUEK K, RIQUELME E, et al. Microbial interactions and the homeostasis of the gut microbiome: the role of *Bifidobacterium*[J]. Microbiome Research Reports, 2023, 2(3):17.
- [43] BARONE M, D'AMICO F, BRIGIDI P, et al. Gut microbiome-micronutrient interaction: the key to controlling the bioavailability of minerals and vitamins? [J]. BioFactors, 2022, 48(2):307-314.
- [44] ZHAO Y C, YU S Q, LI L X, et al. Feeding citrus flavonoid extracts decreases bacterial endotoxin and systemic inflammation and improves immunometabolic status by modulating hindgut microbiome and metabolome in lactating dairy cows[J]. Animal Nutrition, 2023, 13:386-400.
- [45] TARDÓN D C, HOFFMANN C, SANTOS F C R, et al. Relationships among indicators of metabolism, mammary health and the microbiomes of periparturient Holstein cows[J]. Animals, 2021, 12(1):3.

(责任编辑:黄克玲)