

酿酒酵母与粘红酵母共培养物对热应激山羊瘤胃发酵和生长性能的影响

蔡丽媛¹, 辛亮², 薛力刚³, 张芳毓⁴, 李双全^{1*}

1. 湖北绿科乐华生物科技有限公司, 湖北黄冈 438000; 2. 长春博瑞科技股份有限公司, 长春 130051; 3. 吉林农业科技学院, 吉林吉林 132000; 4. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心), 长春 130033

摘要 [目的]明确酿酒酵母与粘红酵母共培养物(SRC)的应用效果,为开发缓解反刍动物热应激的微生态制剂提供理论依据与实践参考。[方法]选取在高温、高湿环境下饲养的60只山羊((90±3)日龄、体重(10.21±1.10) kg),平均分为4组,即在饲喂基础日粮的基础上按照日粮干物质比例的0(对照组)、0.50%(M1)、1.00%(M2)和2.00%(M3)分别饲喂SRC。试验持续28 d,试验结束后,对山羊的抗氧化能力、瘤胃发酵和生长性能相关参数进行检测。[结果]与对照组相比,M2和M3组血清抗氧化酶活性、瘤胃pH、瘤胃短链脂肪酸浓度和纤维素酶活性显著提高($P<0.05$);M2和M3组的干物质采食量、平均日增重、干物质消化率、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维消化率均显著提高($P<0.05$),丙二醛浓度显著降低($P<0.05$)。[结论]添加SRC可提高热应激山羊的抗氧化能力、改善瘤胃发酵和促进山羊生长。基础日粮中SRC的适宜添加量为日粮干物质质量的1.00%。

关键词 热应激山羊;酵母共培养物;抗氧化;瘤胃发酵;生长性能

Effects of the co-culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Rhodotorula glutinis* on the rumen fermentation, and growth performance of heat-stressed goats

CAI Liyuan¹, XIN Liang², XUE Ligang³, ZHANG Fangyu⁴, LI Shuangquan^{1*}

1.Hubei Lucnova Bio-Technology Co. Ltd., Huanggang 438800, China; 2.Changchun Borui Technology Co.,Ltd., Changchun 130051, China; 3.Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132109, China; 4.Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China), Changchun 130033, China

Abstract [Objectives]The effects of applying the co-culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Rhodotorula glutinis* (SRC) were studied to provide theoretical basis and practical reference for the development of microecological preparations to alleviate the heat stress in ruminants.[Methods]60 goats with (90±3) days old and (10.21±1.10) kg raised in high temperature and high humidity environments were divided into four groups including the control, M1, M2, and M3 group on average. They were fed SRC according to the dry matter ratio

收稿日期:2025-07-31

基金项目:湖北省重点研发计划“富含谷胱甘肽和类胡萝卜素酵母培养物的创制与产业化示范”(2023BBB025)

作者简介:蔡丽媛,女,1985年生,博士,畜牧师。*通信作者:李双全,男,1973年生,工程师。

of 0 (control group), 0.50% (M1), 1.00% (M2), and 2.00% (M3) of the diet on top of the basic diet. The experiment of feeding lasted for 28 days. The parameters of antioxidant capacity, rumen fermentation and growth performance of the goats were tested after the experiment. [Results] The activity of antioxidant enzyme in serum, the pH, the content of short-chain fatty acid and activity of cellulase in rumen in the M2 and M3 groups was significantly higher than that in the control group ($P < 0.05$). The intake of dry matter, average daily gain of weight, digestibility of dry matter, and the digestibility of neutral detergent fiber and acidic detergent fiber in M2 and M3 groups were significantly increased ($P < 0.05$), while the content of malondialdehyde in M2 and M3 groups was significantly reduced ($P < 0.05$) compared to that in other groups. [Conclusions] Adding SRC can improve the antioxidant capacity, rumen fermentation, and growth performance of heat-stressed goats. The appropriate amount of SRC added to the basic diet is 1.00% of the weight of dry matter in the basal diet.

Keywords heat-stressed goats; co-culture of yeast; antioxidant capacity; rumen fermentation; growth performance

山羊通常饲养在自然通风的羊舍内,因此它们在夏季容易受到高温高湿环境的影响,从而发生热应激^[1-3]。发生热应激时,动物体内的抗氧化酶系统受到破坏,活性氧不能被及时清除、体内氧化-抗氧化的平衡被破坏,从而导致氧化应激^[4]。研究表明,热应激可引起绵羊和山羊血清超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性和总抗氧化能力(T-AOC)显著降低^[5]。此外,过量自由基的产生可诱导肠黏膜通透性增加,引起肠炎,最终导致动物生长性能下降^[4]。瘤胃是反刍动物重要的消化器官,维持着动物的生理健康^[6],在正常生理条件下,瘤胃菌群处于动态平衡状态^[7]。纤维在瘤胃内主要依赖纤维分解菌,如琥珀酸拟杆菌、黄色瘤球菌、白色瘤球菌和溶纤维丁酸弧菌等进行降解和消化^[8]。当山羊发生热应激时,山羊瘤胃中纤维分解菌的相对丰度显著降低,而淀粉分解菌的相对丰度显著升高^[9]。此外,发生热应激时,瘤胃pH和短链脂肪酸(SCFAs)的浓度显著降低,这一趋势与瘤胃微生物变化密切相关^[9-10]。研究表明,山羊发生热应激后,其干物质采食量(DMI)、平均日增重(ADG)以及干物质(DM)、中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)的消化率均显著降低^[1,9,11]。目前,热应激已成为制约集约化山羊养殖发展的主要因素之一^[12]。因此,寻找一种行之有效的方法来减少热应激对山羊的不利影响势在必行。

酵母培养物是指在特定工艺条件控制下由酵母菌在特定的培养基上经过充分的厌氧发酵后形成的微生态制品,在调节瘤胃环境、促进反刍动物生长性能方面具有积极作用^[13-15]。据报道,酵母培

养物可有效提高瘤胃微生物群的相对丰度和平衡^[16-17],以及通过减少瘤胃内乳酸的积累来维持瘤胃pH的稳定。目前,虽有大量使用酵母培养物来缓解热应激对反刍动物不利影响的研究^[13-14],但是这类研究主要集中在肉牛和奶牛中,很少在山羊中进行。本研究对热应激山羊进行为期28 d的酿酒酵母和粘红酵母共培养物(SRC)饲喂试验,评估SRC对热应激山羊的抗氧化能力、瘤胃发酵和生长性能的影响,旨在为利用SRC提高山羊的抗氧化能力、改善瘤胃发酵和促进生长提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 动物及饲料试验

本试验于2024年7—9月进行,选用(90±3)日龄、体重(10.21±1.10) kg的杂交山羊(波尔×安徽白)60只,饲喂基础日粮1.20 kg/d,分别于每天08:00和17:00饲喂2次,自由饮水。基础日粮的营养成分如表1所示。该动物试验经吉林农业科技学院动物伦理协会批准(伦理号:2022101)。

用于本试验的酵母共培养物(产品名称为胃肠健™)由湖北绿科乐华生物科技有限公司提供。该产品由酿酒酵母1339、粘红酵母LUCNOVA-002和多种底物(73.00%酒糟、6.00%玉米、6.00%豆粕和15.00%麸皮)发酵后制成。发酵过程为液态—半固态—固态三相深度发酵,发酵完成后经低温干燥得到产品。该酵母共培养物主要营养成分和抗氧化物质的含量为:13.0%水分、16.5%粗蛋白、2.5%粗脂肪、27.0%粗纤维、13.0%粗灰分、28.0%无氮浸出物、15.0%酸溶性蛋白/粗蛋白质,0.62%甘露聚糖、

表 1 基础日粮组成及营养水平 g/kg

原料	含量	营养成分	含量
苜蓿	565.0	干物质	954.0
玉米粉	262.0	有机物	855.0
大豆粕	80.00	粗蛋白	175.0
麦麸	76.00	中性洗涤纤维(NDF)	437.0
Ca ₃ HPO ₄	7.00	酸性洗涤纤维(ADF)	258.0
预混料	10.0	钙	6.1
		磷	3.4

注:预混料成分: Mg 20.70 g/kg, Fe 0.50 g/kg, Mn 1.00 g/kg, Zn 2.00 g/kg, Se 43.00 mg/kg, I 47.00 mg/kg, Co 54.00 mg/kg, 维生素 A 90 000 IU/kg, 维生素 D 17 000 IU/kg, 维生素 E 1 750 IU/kg。

3.0% 乳酸、120.7 μg/g 谷胱甘肽、70.24 μg/g 类胡萝卜素, 15.99 μg/g 槲皮素。

将饲养在高温、高湿环境下的 60 只山羊分为 4 组, 在饲喂基础日粮的基础上按照饲料干物质比例的 0.00% (对照组)、0.50% (M1 组)、1.00% (M2 组) 和 2.00% (M3 组) 分别饲喂酿酒酵母与粘红酵母共培养物 (SRC)。饲喂试验分为预试期 7 d 和正试期

21 d, 共 28 d。在第 25~27 天的晨饲中添加 5.00 g Cr₂O₃ 作为测定营养物质消化率的外源指示剂。于第 26~28 天下午饲喂时收集粪便标本, 将同一组的粪便放在一起。分别于饲喂试验前 1 d (第 0 天)、第 14 天和第 28 天采血。第 28 天上午采集瘤胃内容物。

1.2 检测

饲喂试验期间, 用干湿球温度计监测山羊舍内的温度和湿度, 并按以下公式计算温湿度指数 (THI): $THI = db - (0.55 - 0.55 RH)(db - 58)$ 。其中 db 为干球温度, 单位为华氏温度 (°F), RH 为相对湿度, 单位为百分比。分别于饲喂试验的第 0、14 和 28 天的 08:00、14:00 和 20:00 测定山羊的直肠和皮肤温度、脉搏和呼吸频率。参考 Xue 等^[19]研究, 并使用 2^{-ΔΔCt} 方法^[20], 对山羊外周血淋巴细胞中 HSP70 家族基因的表达进行测定, 为确保结果的准确性, 每个样本进行 3 次分析。山羊热应激相关基因的引物序列见表 2。

表 2 热应激相关基因的引物序列

基因	引物序列	长度/bp	退火温度/°C	基因库序列号
<i>β-actin</i>	F: TCTGGCACCACACCTTCTAC	102	60	XM 018039831.1
	R: TCTTCTCACGGTTGGGCCTTG			
<i>HSPA 1</i>	F: CGACCAGGAAACCGGCAC	151	60	NM 005677146.3
	R: CGGTCGCCGAACCTGC			
<i>HSPA 6</i>	F: TCTGCCGCAACAGGATAAA	239	60	NM_001314233.1
	R: CGCCCACGCACGACTAC			
<i>HSPA 8</i>	F: ACCTCTATTACCCGTGCCC	203	60	XM 018039831.1
	R: CTCTTATTCATTCTCCATT			

将血液样本在 3 000 r/min 的转速下离心 10 min, 得到血清。使用南京建成试剂盒对第 28 天血清中的皮质醇浓、T-AOC、T-SOD、GSH-Px 和 MDA 进行检测。采集到瘤胃内容物时, 立即用 pH 计测定其 pH 值。参考 Yang 等^[21]方法, 测定瘤胃液中 SCFA 浓度。根据 Ciulu 等^[22]、GB/T 17819—1999《维生素预混料中维生素 B12 的测定(高效液相色谱法)》和 GB/T 5009 197—2003《保健食品中盐酸硫胺素、盐酸吡哆醇、烟酸、烟酰胺和咖啡因的测定方法》, 测定瘤胃液中维生素 B₁、B₂、B₆、B₁₂ 和烟酸浓度。参考汪水平等^[23]的方法, 测定微晶纤维素酶、羧甲基纤维素的酶、纤维二糖酶和木聚糖酶的活性。干物质采食量 (DMI) 由每天提供的饲料质量减去剩余饲料质量得到。

在饲喂试验开始的前 1 d 和结束后的第 2 天早

晨饲喂前, 分别测定山羊的体重并计算体重的增加量。

可根据以下公式^[24]对营养物质的消化率进行计算:

$$\text{消化率} = (1 - (\text{日粮中指示剂 Cr}_2\text{O}_3 \text{ 浓度} \times \text{粪便中待测养分浓度}) / (\text{粪便中指示剂 Cr}_2\text{O}_3 \text{ 浓度} \times \text{日粮中待测养分浓度})) \times 100\%$$

1.3 统计分析

使用 R 软件 (v.4.0.2) 中的 stats 包进行统计分析, 采用 Kruskal-Wallis 检验, 将对照组与 M1、M2 和 M3 组的数据进行比较。P < 0.05 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 添加 SRC 对山羊生理参数的影响

由表 3 可知, 在山羊饲喂试验期间, 山羊舍内温

度、相对湿度和温湿指数 (THI) 分别为 (32.67±1.07) °C、(83.82±2.33)% 和 87.88±1.83。对照组、M1、M2 和 M3 组山羊的皮肤温度、直肠温度、脉搏和呼吸频率无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 添加 SRC 对山羊皮温、直肠温度、脉搏和呼吸频率的影响

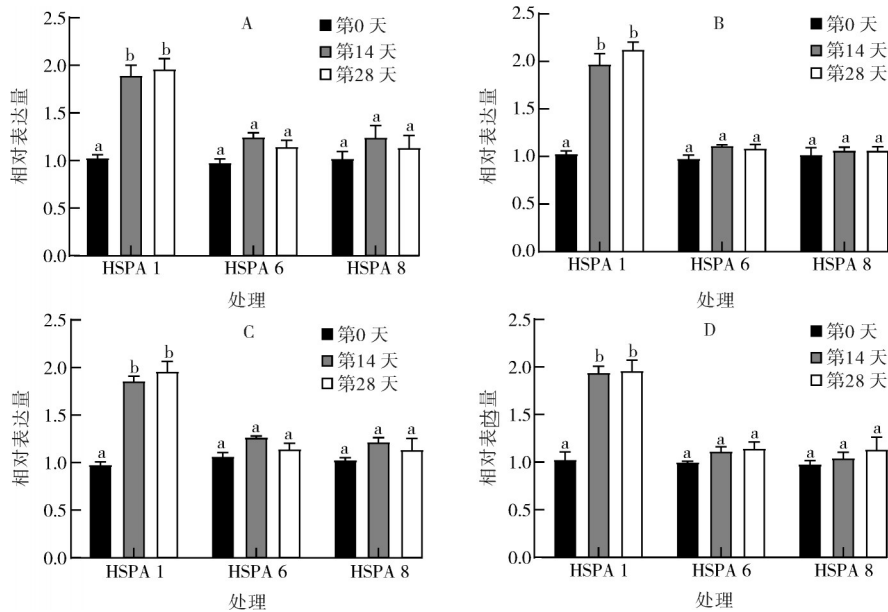
参数	对照组	M1	M2	M3
皮温/°C	36.05±0.37a	36.06±0.04a	36.15±0.14a	36.05±0.11a
直肠温度/°C	39.21±0.07a	39.12±0.12a	39.16±0.06a	39.17±0.12a
脉搏/(次/min)	81.45±1.03a	81.51±1.33a	81.53±0.56a	82.09±1.11a
呼吸频率/(次/min)	33.21±1.01a	33.23±0.78a	33.27±1.23a	33.24±0.67a

注:同行标注的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$),相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。下同。

与第 0 天相比,对照组、M1、M2 和 M3 组山羊外周血淋巴细胞热休克蛋白 HSPA 1 的表达量在第 14 天和第 28 天显著升高 ($P<0.05$;图 1),但 HSPA 6 和 HSPA 8 在第 14 天和第 28 天的表达水平无显著

差异 ($P>0.05$)。

与第 0 天比较,试验组、M1、M2 和 M3 组血清皮质醇浓度在第 14 天和第 28 天显著升高 ($P<0.05$;图 2)。



A:对照组;B:M1组;C:M2组;D:M3组。

图 1 山羊外周血淋巴细胞热休克蛋白 70(HSP70)家族成员基因的表达式水平

2.2 添加 SRC 对山羊血清抗氧化指标的影响

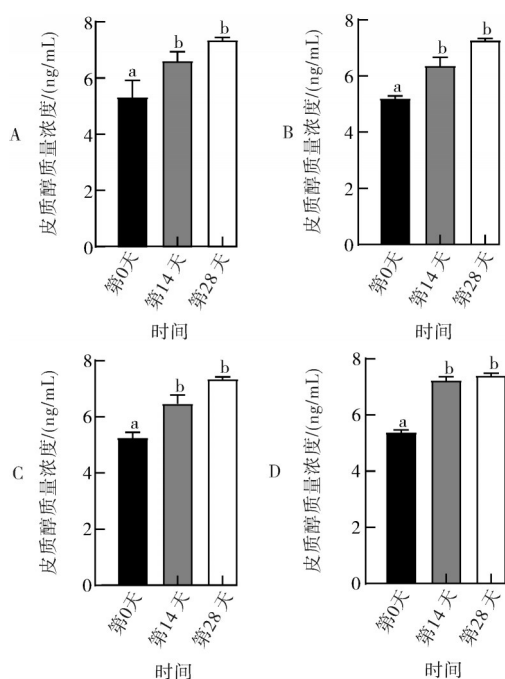
由表 4 可知,与对照组相比,M2 和 M3 组山羊血清的 T-AOC、T-SOD 和 GSH-Px 活性均显著提高 ($P<0.05$),而 MDA 浓度显著降低 ($P<0.05$)。M1 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$),而与 M2、M3 组差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 添加 SRC 对山羊瘤胃发酵参数的影响

由表 5 可知,与对照组相比,M2 和 M3 组瘤胃 pH 值、总短链脂肪酸、乙酸、丙酸、丁酸、维生素 B₁、B₂ 和烟酸浓度、微晶纤维素酶、羧甲基纤维素酶、纤维二糖酶和木聚糖酶活性显著升高 ($P<0.05$);M1 组与对照组无显著差异 ($P>0.05$),而与 M2、M3 组差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 添加 SRC 对热应激山羊血清 T-AOC、T-SOD、GSH-Px 和 MDA 含量的影响

参数	对照组	M1	M2	M3
T-AOC/(U/mL)	3.67±0.24b	4.09±0.56b	5.09±0.45a	5.07±0.33a
T-SOD/(U/mL)	67.28±2.41b	72.42±2.89b	87.57±3.92a	87.77±2.19a
GSH-Px/(U/mL)	194.50±22.32b	215.50±23.11b	249.00±17.81a	249.30±13.24a
MDA/(nmol/L)	8.54±0.57a	7.72±1.76a	6.55±0.89b	6.58±0.45b



A: 对照组; B: M1 组; C: M2 组; D: M3 组。

图 2 山羊血清皮质醇浓度

2.4 添加 SRC 对热应激山羊生长性能的影响

由表 6 可知, 与对照组相比, M2 和 M3 组

的 DMI、ADG、DM、NDF 和 ADF 消化率均显著提高 ($P < 0.05$); 而各组之间的 FCR 无显著差异 ($P > 0.05$)。

3 讨论

在本研究中, 羊舍内 THI 值大于 82, 热休克蛋白 HSPA1 的相对表达量和血清皮质醇浓度显著升高, 这表明在本研究饲喂试验进行期间的山羊处于热应激状态^[18,25-27]。据研究报告, 饲料中添加酵母培养物可显著提高公牛和山羊血清 T-AOC、SOD 和 GSH-Px 活性, 同时降低血清 MDA 浓度^[13-14,28]。本研究中, 在热应激山羊日粮中添加 SRC, 上述指标的变化趋势与先前的研究结果一致。本研究使用的酵母共培养物能提高山羊的抗氧化能力, 是因为它可以通过提供直接抗氧化成分(谷胱甘肽、类胡萝卜素、槲皮素等)和必需营养素(氨基酸、小肽、维生素、各种酶、核酸等)激活宿主抗氧化信号通路, 全面提高山羊的抗氧化能力。然而, 酵母培养物的抗氧化效果会受到菌株、培养条件和宿主状态的影响^[13,29-30]。

表 5 添加 SRC 对热应激山羊瘤胃 pH 值、挥发性脂肪酸含量及纤维素酶活性的影响

参数	对照组	M1	M2	M3
pH	6.51±0.05b	6.55±0.03b	6.70±0.05a	6.70±0.02a
总短链脂肪酸/(mmol/L)	39.96±2.94b	41.01±1.47b	50.53±2.67a	50.72±2.31a
乙酸/(mmol/L)	17.22±0.45b	17.53±1.43b	22.42±2.45a	22.47±1.87a
丙酸/(mmol/L)	12.87±1.22b	13.23±0.98b	15.68±2.56a	15.77±0.67a
丁酸/(mmol/L)	9.87±0.45b	10.25±0.66b	12.43±0.34a	12.48±0.87a
微晶纤维素酶/(IU/mL)	1.38±0.04b	1.51±0.11b	2.15±0.33a	2.14±0.09a
羧甲基纤维素酶/(IU/mL)	1.44±0.12b	1.57±0.34b	2.30±0.62a	2.28±0.24a
纤维二糖酶/(IU/mL)	2.43±0.32b	2.48±0.08b	3.56±0.48a	3.73±0.21a
木聚糖酶/(IU/mL)	4.07±0.67b	4.20±0.45b	5.54±0.91a	5.97±0.35a
维生素 B ₁ /(μg/mL)	0.16±0.04b	0.21±0.02b	0.47±0.05a	0.45±0.03a
维生素 B ₂ /(μg/mL)	0.15±0.02b	0.18±0.03b	0.45±0.02a	0.48±0.02a
维生素 B ₆ /(μg/mL)	4.66±0.32a	4.69±0.21a	5.10±0.23a	5.12±0.32a
维生素 B ₁₂ /(μg/mL)	3.24±0.24a	3.25±0.31a	3.33±0.21a	3.47±0.33a
烟酸/(μg/mL)	13.20±0.14b	14.23±0.27b	23.15±0.30a	22.42±0.11a

表 6 添加 SRC 对热应激山羊采食量、日增重、饲料转化率和消化率的影响

参数	对照组	M1	M2	M3
采食量(DMI)/g	546.00±9.77b	546.50±12.24b	598.00±5.50a	594.80±10.44a
日增重(ADG)/g	215.20±3.86b	217.10±3.77b	234.60±8.96a	238.40±4.87a
饲料转化率(FCR)	2.53±0.08a	2.51±0.07a	2.55±0.10a	2.50±0.05a
干物质消化率(DM)/%	40.21±3.11a	42.25±2.45a	49.74±4.64b	50.76±3.12b
中性洗涤纤维消化率(NDF)/%	37.43±2.13a	38.42±3.23a	42.30±3.27b	42.51±1.56b
酸性洗涤纤维消化率(ADF)/%	43.44±4.15a	44.45±2.45a	50.15±4.56b	50.42±3.12b

饲料中添加酵母培养物是减轻热应激对瘤胃发酵不利影响的有效途径之一^[13-14]。在本研究中,添加 SRC 显著提高了热应激山羊瘤胃 pH 值,这是由于增加了瘤胃微生物对乳酸的利用引起^[9,21]。此外,pH 的提升还依赖于 SRC 可以促进瘤胃中微生物丰度的提高,这些微生物可以消耗瘤胃中的乳酸^[20,31],从而防止因其堆积造成 pH 值降低。然而,先前的一项研究也报道了补充酵母培养物对瘤胃 pH 无显著影响^[13]。研究结果不一致,可能是由于使用了不同的酵母培养物或培养物添加量存在差异所导致。本研究中,在热应激山羊的日粮中添加 SRC 后,瘤胃中总 SCFAs、乙酸、丙酸和丁酸浓度显著升高。这些结果与之前的研究一致,即在热应激山羊和公牛的日粮中添加酵母培养物可显著增加 SCFAs 浓度^[13,30]。然而也有报道称,补充酵母培养物不会影响瘤胃 SCFAs 浓度^[32-33]。瘤胃 SCFAs 浓度的增加是由于添加了 SRC,提高了瘤胃纤维素分解菌的活性,使它们在瘤胃内对饲料底物的分解增强,由此提高了 SCFAs 的浓度^[34-35]。本研究并未具体分析 SRC 对瘤胃中纤维分解菌相对丰度和功能的影响,在今后的研究中应充分对瘤胃微生物相对丰度和功能进行分析,从而能更详尽地阐述 SRC 对瘤胃中 SCFAs 的影响机制。

B 族维生素可作为酶的辅助因子或辅助因子的前体参与宿主的营养代谢过程,反刍动物瘤胃微生物可以代谢产生 B 族维生素,当山羊遭受热应激时,瘤胃中这类维生素的产量显著下降^[11,36-38]。本研究中,在热应激山羊日粮中添加 SRC,山羊瘤胃维生素 B₁、B₂ 和烟酸浓度显著增加,这些结果与先前的研究一致^[11]。这可能是由于 SRC 为瘤胃微生物群提供了发酵底物,使它们在瘤胃中代谢生成 B 族维生素的能力提升所引起。此外, SRC 富含 B 族维生素,可直接补充瘤胃中这类维生素的含量^[4,39]。

本研究中,在热应激山羊日粮中补充 SRC 可使 DMI 显著增加。这是由于酵母培养物具有良好的风味,可以改善饲料适口性,促进热应激山羊的采食^[40]。在山羊日粮中添加 SRC, DM、NDF 和 ADF 的消化率显著提高,这与先前的研究一致^[11,19,27]。这是由于添加 SRC 后,瘤胃中微晶纤维素酶、羧甲基纤维素酶、纤维二糖酶和木聚糖酶活性显著提高,从而提高了饲料的消化率。添加 SRC 可显著提高热应激山羊的平均日增重,这一结果与以往的研究结果一

致^[13]。酵母培养物营养丰富,包括 B 族维生素、矿物质、消化酶、生长因子、多种氨基酸、未知生长因子等^[40],这是提升热应激山羊生长性能的重要原因。

4 结 论

日粮中添加 SRC,热应激山羊血清 T-AOC、T-SOD 和 GSH-Px 活性、瘤胃 pH 值、SCFAs 浓度、B 族维生素浓度和纤维素水解酶活性均显著升高。此外,日粮中添加 SRC 显著提高了热应激山羊 DM、NDF 和 ADF 的消化率, SRC 的最佳添加量为日粮干物质重的 1.00%。

参 考 文 献

- [1] CAI L Y, YU J K, HARTANTO R, et al. Effects of heat challenge on growth performance, ruminal, blood and physiological parameters of Chinese crossbred goats [J]. *Small ruminant research*, 2019, 174: 125-130.
- [2] SEJIAN V, SILPA M V, RESHMA NAIR M R, et al. Heat stress and goat welfare: adaptation and production considerations [J/OL]. *Animals*, 2021, 11(4): 1021 [2025-07-31]. <https://doi.org/10.3390/ani11041021>.
- [3] DANSO F, IDDRISU L, LUNGU S E, et al. Effects of heat stress on goat production and mitigating strategies: a review [J/OL]. *Animals*, 2024, 14(12): 1793 [2025-07-31]. <https://doi.org/10.3390/ani14121793>.
- [4] THANAN R, OIKAWA S, HIRAKU Y, et al. Oxidative stress and its significant roles in neurodegenerative diseases and cancer [J]. *International journal of molecular sciences*, 2014, 16(1): 193-217.
- [5] 张灿, 王之盛, 彭全辉, 等. 湿热应激对藏绵羊和山羊生长性能、抗氧化能力以及免疫功能的影响 [J]. *动物营养学报*, 2017, 29(6): 2179-2187.
- [6] 石璐璐, 徐元庆, 王哲奇, 等. 热应激诱发的氧化应激对羊的影响及其作用机制 [J]. *动物营养学报*, 2019, 31(7): 3016-3022.
- [7] 冯仰廉. 反刍动物营养学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 杜瑞平, 温雅俐, 姚焰础, 等. 热应激对奶牛瘤胃液微生物数量的影响 [J]. *动物营养学报*, 2013, 25(2): 334-343.
- [9] 蔡丽媛. 集约化羊舍的环境控制及热应激对山羊瘤胃发酵的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [10] UYENO Y, SEKIGUCHI Y, TAJIMA K, et al. An rRNA-based analysis for evaluating the effect of heat stress on the rumen microbial composition of Holstein heifers [J]. *Anaerobe*, 2010, 16(1): 27-33.
- [11] CAI L Y, HARTANTO R, XU Q B, et al. *Saccharomyces cerevisiae* and *Clostridium butyricum* could improve B-vitamin production in the rumen and growth performance of heat-stressed goats [J/OL]. *Metabolites*, 2022, 12(8): 766 [2025-07-31]. <https://doi.org/10.3390/metabo12080766>.
- [12] 李川. 谷氨酸对热应激湖羊生产性能、胃肠道功能的影响及其机理研究 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
- [13] ZHANG X, LIANG H, XU L J, et al. Rumen fermentative metabolo-

- mic and blood insights into the effect of yeast culture supplement on growing bulls under heat stress conditions[J/OL]. *Frontiers in microbiology*, 2022, 13: 947822[2025-07-31]. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.947822>.
- [14] WANG L Z, WANG Z S, ZOU H W, et al. Yeast culture and vitamin E supplementation alleviates heat stress in dairy goats[J]. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 2016, 29(6): 814-822.
- [15] XU Z X, YANG L, CHEN H, et al. *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* yeast co-cultures modulate the ruminal microbiome and metabolite availability to enhance rumen barrier function and growth performance in weaned lambs[J]. *Animal nutrition*, 2024, 19: 139-152.
- [16] TAKEMURA K, SHINGU H, IKUTA K, et al. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on growth performance, plasma metabolites and hormones, and rumen fermentation in Holstein calves during pre- and post-weaning periods[J/OL]. *Animal science journal*, 2020, 91(1): e13402[2025-07-31]. <https://doi.org/10.1111/asj.13402>.
- [17] SUNTARA C, CHERDTHONG A, WANAPAT M, et al. Isolation and characterization of yeasts from rumen fluids for potential use as additives in ruminant feeding[J/OL]. *Veterinary sciences*, 2021, 8(3): 52[2025-07-31]. <https://doi.org/10.3390/vetsci8030052>.
- [18] MONTEIRO H F, AGUSTINHO B C, VINYARD J R, et al. *Megasphaera elsdenii* and *Saccharomyces cerevisiae* as direct fed microbials during an *in vitro* acute ruminal acidosis challenge[J/OL]. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 7978[2025-07-31]. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11959-2>.
- [19] XUE L G, WANG D, ZHANG F Y, et al. Prophylactic feeding of *Clostridium butyricum* and *Saccharomyces cerevisiae* were advantageous in resisting the adverse effects of heat stress on rumen fermentation and growth performance in goats[J/OL]. *Animals*, 2022, 12(18): 2455[2025-07-31]. <https://doi.org/10.3390/ani12182455>.
- [20] RAMAKERS C, RUIJTER J M, DEPREZ R H L, et al. Assumption-free analysis of quantitative real-time polymerase chain reaction (PCR) data[J]. *Neuroscience letters*, 2003, 339(1): 62-66.
- [21] YANG W Z, BEAUCHEMIN K A, RODE L M, et al. Effects of grain processing, forage to concentrate ratio, and forage particle size on rumen pH and digestion by dairy cows I[J]. *Journal of dairy science*, 2001, 84(10): 2203-2216.
- [22] CIULU M, SOLINAS S, FLORIS I, et al. RP-HPLC determination of water-soluble vitamins in honey[J]. *Talanta*, 2011, 83(3): 924-929.
- [23] 汪水平, 王文娟. 瘤胃纤维降解相关酶活性的测定[J]. *中国饲料*, 2006(11): 31-32.
- [24] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- [25] TAJIMA K, NONAKA I, HIGUCHI K, et al. Influence of high temperature and humidity on rumen bacterial diversity in Holstein heifers[J]. *Anaerobe*, 2007, 13(2): 57-64.
- [26] CAI L Y, HARTANTO R, ZHANG J, et al. *Clostridium butyricum* improves rumen fermentation and growth performance of heat-stressed goats *in vitro* and *in vivo*[J/OL]. *Animals*, 2021, 11(11): 3261 [2025-07-31]. <https://doi.org/10.3390/ani11113261>.
- [27] CAI L Y, YU J K, HARTANTO R, et al. Dietary supplementation with *Saccharomyces cerevisiae*, *Clostridium butyricum* and their combination ameliorate rumen fermentation and growth performance of heat-stressed goats[J/OL]. *Animals*, 2021, 11(7): 2116 [2025-07-31]. <https://doi.org/10.3390/ani11072116>.
- [28] BROADWAY P R, CARROLL J A, SANCHEZ N C B. Live yeast and yeast cell wall supplements enhance immune function and performance in food-producing livestock: a review[J]. *Microorganisms*, 2015, 3(3): 417-427.
- [29] BILAL R M, HASSAN F U, SAEED M, et al. Role of yeast and yeast-derived products as feed additives in broiler nutrition[J]. *Animal biotechnology*, 2023, 34(2): 392-401.
- [30] 李库, 周雪巍, 武惠敏, 等. 不同菌株发酵得到的酵母蛋白营养成分及结构差异分析[J]. *食品科技*, 2024, 49(6): 26-34.
- [31] 许啸, 李燕, 王超, 等. 热应激对奶山羊抗氧化能力和 HSP70 mRNA 表达的影响及有机铬的作用机理研究[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会. 中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十一次全国动物营养学术研讨会论文集. 华中农业大学动物营养与饲料科学系, 2012: 364.
- [32] LILA Z A, MOHAMMED N, YASUI T, et al. Effects of a twin strain of *Saccharomyces cerevisiae* live cells on mixed ruminal microorganism fermentation *in vitro*[J]. *Journal of animal science*, 2004, 82(6): 1847-1854.
- [33] QADIS A Q, GOYA S, IKUTA K, et al. Effects of a bacteria-based probiotic on ruminal pH, volatile fatty acids and bacterial flora of Holstein calves[J]. *The journal of veterinary medical science*, 2014, 76(60): 877-885.
- [34] KŘIŽOVÁ L, RICHTER M, TRÍNÁCTY J, et al. The effect of feeding live yeast cultures on ruminal pH and redox potential in dry cows as continuously measured by a new wireless device[J]. *Czech journal of animal science*, 2011, 56(1): 37-45.
- [35] UYENO Y, AKIYAMA K, HASUNUMA T, et al. Effects of supplementing an active dry yeast product on rumen microbial community composition and on subsequent rumen fermentation of lactating cows in the mid-to-late lactation period[J]. *Animal science journal*, 2017, 88(1): 119-124.
- [36] RUSSELL J B, RYCHLIK J L. Factors that alter rumen microbial ecology[J]. *Science*, 2001, 292(5519): 1119-1122.
- [37] CHEN B, WANG C, WANG Y M, et al. Effect of biotin on milk performance of dairy cattle: a Meta-analysis[J]. *Journal of dairy science*, 2011, 94(7): 3537-3546.
- [38] 赵芸君, 孟庆翔. B族维生素在瘤胃中的合成及影响因素[J]. *动物营养学报*, 2007, 19(S1): 492-497.
- [39] ARAKI Y, ANDOH A, FUJIYAMA Y, et al. Oral administration of a product derived from *Clostridium butyricum* in rats[J]. *International journal of molecular medicine*, 2002, 9(1): 53-57.
- [40] 郭永清, 赵宇飞, 张小宇. 酵母培养物对断奶犊牛生长性能及瘤胃发酵的影响[J]. *饲料研究*, 2019, 42(11): 10-13.