



甘草多糖对育肥牛生长性能、血液指标及瘤胃内环境的影响

叶苗苗¹, 朱潇鹏², 周正海¹, 张志鹏¹, 杨本顺¹, 咎林森¹, 杨武才^{1*}

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 杨凌 712100; 2. 张掖市万禾草畜产业科技开发有限公司, 张掖 734000)

摘要: 旨在探究饲料中添加甘草多糖(*Glycyrrhiza* polysaccharides, GCPs)对育肥肉牛生长性能、血清指标、养分表观消化率、瘤胃发酵参数及瘤胃微生物的影响。本研究选取40头生长发育状况良好、体重(617.70±18.85) kg的西门塔尔育肥公牛为试验动物, 随机分为4组, 各试验组在基础日粮中分别添加0 mg·kg⁻¹ BW(对照组, G0组)、15 mg·kg⁻¹ BW(低剂量组, G15组)、30 mg·kg⁻¹ BW(中剂量组, G30组)、45 mg·kg⁻¹ BW(高剂量组, G45组) GCPs, 预饲期10 d, 正饲期90 d。测定每头牛正饲0、45、90 d的体重, 计算平均日增重; 记录每天采食量, 计算平均干物质采食量及料重比; 正饲45、90 d每头牛采集10 mL血液, 测定血清生化指标、抗氧化指标及免疫指标; 试验结束后, 每头牛采集300 g粪便测定养分表观消化率, 采集50 mL瘤胃液测定瘤胃发酵参数及瘤胃微生物相关指标。结果显示: 与G0组相比: 1) 0~45 d及0~90 d阶段, G30、G45组平均日增重及干物质采食量显著增加($P<0.05$); 0~90 d阶段, G30、G45组料重比显著下降($P<0.05$), 粗脂肪消化率显著提高($P<0.05$); 2) G30组血清谷草转氨酶水平、谷丙转氨酶水平显著下降($P<0.05$); 45 d试验组血清超氧化物歧化酶与白细胞介素10水平显著提高($P<0.05$); 3) G15、G30组乙酸比例显著下降($P<0.05$), G30组丁酸比例显著提高($P<0.05$); 4) G30组瘤胃微生物群落Chao1丰富度指数显著提高($P<0.05$), 且瘤胃微生物结构发生变化; G30组育肥肉牛瘤胃拟杆菌门(Bacteroidota)、假单胞菌门(Pseudomonadota)、纤维杆菌门(Fibrobacterota)、普雷沃氏菌属(*Prevotella*)及纤维杆菌属(*Fibrobacter*)相对丰度呈现显著上升趋势, 而厚壁菌门(Bacillota)相对丰度呈显著下降趋势($P<0.05$); G15组瘤胃微生物差异代谢通路主要集中在酮体合成与降解、硝基甲苯降解; G30组瘤胃微生物差异代谢通路主要集中在氨基酸代谢、脂肪酸生物合成; G45组瘤胃微生物差异代谢通路主要集中在C5-支链二元酸代谢。综上, 日粮中添加甘草多糖提高了西门塔尔育肥肉牛的生长性能、抗氧化能力、免疫能力、养分消化率, 改善了瘤胃发酵模式, 促进瘤胃有益菌丰度增加。在本试验研究条件下, 甘草多糖最适添加量为30 mg·kg⁻¹ BW。

关键词: 育肥牛; 甘草多糖; 生长性能; 瘤胃发酵; 瘤胃微生物

中图分类号: S823.5

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)03-1516-18

Effects of *Glycyrrhiza* Polysaccharides on Growth Performance, Serum Indexes and Rumen Environment of Fattening Cattle

YE Miaomiao¹, ZHU Xiaopeng², ZHOU Zhenghai¹, ZHANG Zhipeng¹, YANG Benshun¹,
ZAN Linsen¹, YANG Wucai^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Zhangye Wanhe Grass & Livestock Technology Co., Ltd., Zhangye 734000, China)

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 国家肉牛牦牛产业技术体系建设(CARS-37); 陕西省重点研发计划“两链”融合重点专项揭榜挂帅项目(2022GD-TSLD-46-0104)

作者简介: 叶苗苗, 硕士, 主要从事动物营养调控研究, E-mail: 17331349676@163.com

* 通信作者: 杨武才, 主要从事动物肉质性状形成的分子遗传调控机理、动物生殖生理调控与动物生物技术研究, E-mail: yangwucai111@163.com

com

Abstract: This experiment aimed to investigate the effects of dietary supplementation with *Glycyrrhiza* polysaccharides (GCPs) on the growth performance, serum indicators, apparent nutrient digestibility, rumen fermentation parameters and microbial communities in fattening beef cattle. Forty Simmental fattening bulls with good growth status and an average body weight of 617.70 ± 18.85 kg were selected as experimental animals and randomly divided into four groups. The experimental groups received the basal diet supplemented with $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW (control group, G0), $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW (low-dose, G15), $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW (medium-dose, G30), or $45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW (high-dose, G45) of GCPs, respectively. The trial included a 10-day adaptation period followed by a 90-day feeding period. The body weight were measured at 0, 45, 90 d of the feeding period, daily feed intake was recorded to determine average dry matter intake and feed-to-gain ratio. At 45 and 90 d of the feeding period, 10 mL of blood sample was collected from each bull to assess serum biochemical, antioxidant and immune indicators. At the end of the trial, 300 g of feces sample was collected from each bull to evaluate nutrient apparent digestibility, and 50 mL of rumen fluid was collected to analyze rumen fermentation parameters and microbial related indicators. Compared with the G0 group: 1) During the 0-45 d and 0-90 d periods, the average daily gain and average dry matter intake of the G30 and G45 groups were significantly increased ($P < 0.05$); in the 0-90 d period, the feed conversion ratio of the G30 and G45 groups decreased significantly ($P < 0.05$), while the crude fat digestibility increased significantly ($P < 0.05$); 2) The serum aspartate aminotransferase level and alanine aminotransferase level of the G30 group were significantly decreased ($P < 0.05$); at 45 d, the serum levels of superoxide dismutase and interleukin-10 in the experimental groups increased significantly ($P < 0.05$); 3) The acetic acid proportion of the G15 and G30 groups was significantly decreased ($P < 0.05$), the butyric acid proportion of the G30 group was significantly increased ($P < 0.05$); 4) The Chao1 richness index of the rumen microbial community in the G30 group was significantly increased ($P < 0.05$), along with structural changes in microbial composition. In the G30 group, the relative abundance of Bacteroidota, Pseudomonadota, Fibrobacterota, *Prevotella* and *Fibrobacter* showed a significant upward trend, while the relative abundance of Bacillota showed a significant downward trend ($P < 0.05$); the differential metabolic pathways of rumen microorganisms in the G15 group were mainly enriched in Synthesis and Degradation of ketonebodies, and nitrotoluene degradation. In the G30 group, these pathways were mainly linked to Amino acid metabolism, and Fatty acid biosynthesis, while the G45 group showed enrichment in C5-branched dibasic acid metabolism. In summary, dietary supplementation of *Glycyrrhiza* polysaccharides enhanced the growth performance, antioxidant capacity, immune function, and nutrient digestibility of Simmental fattening beef cattle, while optimizing rumen fermentation patterns and promoting beneficial rumen microorganisms. Under the conditions of this experimental study, the optimal addition amount of GCPs was $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW.

Keywords: fattening cattle; *Glycyrrhiza* polysaccharides; growth performance; rumen fermentation; rumen microorganisms

* **Corresponding author:** YANG Wucui, E-mail: yangwucui111@163.com

牛肉具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇和氨基酸丰富等优点,其所含的营养成分也易于人体吸收。随着人民生活水平的不断提高,对牛肉的需求也与

日俱增,我国牛肉消费水平增长空间巨大。同时食品安全问题日益受到关注,绿色畜产品的市场需求旺盛^[1]。近年来,在高品质牛肉生产过程中,多糖的

应用逐渐受到重视^[2-3]。作为广泛存在于动植物及微生物中的高分子量碳水化合物,多糖表现出多种功能形式,例如构建细胞膜,储存能量,细胞识别、分化、增殖以及控制细胞信号传导等^[4]。与微生物来源和化学合成的多糖相比,植物多糖通常具有较低的毒性和较少的副作用,作为添加剂使用其安全性更高^[5]。同时,植物多糖来源广泛,且具有良好的生物相容性,不易引起免疫排斥反应。这些特性为植物多糖在抗生素禁用的背景下,作为功能性饲料添加剂的开发提供了坚实基础^[6-7]。

甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)为豆科甘草属多年生草本植物的统称,主要分布于我国西北及华北干旱、半干旱地区,具有极强的生态适应性^[8],作为一种传统药食兼用植物,其主要成分包括皂苷、甘草酸、类黄酮和多糖^[9]。据《中国药典》记录,乌拉尔甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch)是我国传统药用甘草的主要来源种^[10]。甘草多糖(*Glycyrrhiza polysaccharide*, GCPs)是一种富含还原性末端的水溶性多糖,主要由鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖组成,其生物活性与 α -D-吡喃多糖的空间结构密切相关,具备多种药理活性^[11]。研究表明,从乌拉尔甘草中分离纯化的多糖具有较好的体外DPPH和羟基自由基清除能力^[12]。将甘草多糖与李特斯菌混合培养后发现,甘草多糖不仅具有抑菌和杀菌功效,还能显著提高培养上清液中水解酶活性与蛋白质含量,抑制李特斯菌生物被膜的形成,从而增强机体的抗菌和抗感染能力^[13]。此外,甘草多糖可促进树突状细胞成熟,增强细胞因子分泌能力;同时甘草多糖处理后的树突状细胞表现出更强的淋巴结迁移能力,表明其在免疫激活过程中的关键作用^[14]。甘草多糖在抗氧化、抗菌及免疫调节等方面具有显著的生物活性,可作为一种极具开发价值的天然产物,在畜牧生产中实现广泛应用。

虽然甘草多糖在猪和家禽促生长以及改善机体免疫健康方面已有报道^[15-16],但其对反刍动物的影响研究不足,相关试验数据匮乏。本研究通过在育肥肉牛日粮中添加不同剂量甘草多糖,探究其对西门塔尔育肥肉牛生长性能、血清指标、营养物质消化率、瘤胃发酵参数及微生物的影响,并筛选出育肥肉牛日粮中甘草多糖的最适添加量,探究甘草多糖作为新型饲料添加剂应用于育肥肉牛产业发展的可行性,旨在为促进生态友好型畜牧业发展奠定科学基础。

1 材料与方法

1.1 试验动物与材料

本试验所用育肥肉牛选自甘肃省张掖市万禾草畜产业科技开发有限公司。试验所用甘草多糖(质量分数 $\geq 30\%$)购自陕西昊辰生物科技有限公司。谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)测定试剂盒(A005-1-2)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)测定试剂盒(A001-3-1)购自南京建成生物工程研究所;丙二醛(MDA)含量检测试剂盒(BC0025)、总抗氧化能力(T-AOC)检测试剂盒(BC1315)购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 试验设计及饲养管理

选择40头生长发育状况良好、体重相近的西门塔尔育肥公牛(617.70 ± 18.85 kg)为试验动物,采取完全随机试验设计,将试验牛随机分为4组,每组10头牛,分别为:对照组(G0组、基础日粮)、低剂量组(G15组、基础日粮+ $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW GCPs)、中剂量组(G30组、基础日粮+ $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW GCPs)、高剂量组(G45组、基础日粮+ $45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ BW GCPs)。每日09:00与17:00饲喂两次全混合日粮(TMR),各组饲粮营养水平一致,基础饲粮参照《中国肉牛饲养标准》(NY/T 815—2004) 600 kg体重西门塔尔育肥肉牛每日增重1 kg所需要的营养标准制定。饲粮基础组成及营养水平见表1,饲喂时将GCPs与日粮混合均匀,试验牛只自由饮水。每天观察试验牛体况,定期清理牛圈,保证卫生状况。试验共计100 d,其中预饲期10 d,正饲期90 d。

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 生长性能 正饲期第0、45、90天,晨饲前连续两次测定试验育肥肉牛的空腹体重,并计算其平均值。基于每头牛的平均体重数据,进一步计算平均日增重(ADG);饲料投喂量每日定时(9:00和17:00)称重,剩料在16:00和次日8:00清理并记录,用于平均干物质采食量(ADMI)计算。并通过平均干物质采食量(ADMI)与平均日增重(ADG)的比值,计算料重比(F/G)。

1.3.2 血清指标 正饲期第45、90天,晨饲前对空腹育肥肉牛进行尾根采血($10 \text{ mL} \cdot \text{头}^{-1}$),使用预冷离心机(4°C), $3\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心15 min,分离上清液, -20°C 冰箱密封保存,用于血清指标检测。血清生化指标(总蛋白、白蛋白、总胆固醇、甘油三酯、葡萄糖、尿素氮、高密度脂蛋白、低密度脂蛋白、

表1 基础饲粮组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutritional level of basic diet (air-dry basis)

原料 Ingredient	含量/% Content	营养水平 Nutritional level	含量/% Content
麦草 Wheat straw	4.50	代谢能/(MJ·kg ⁻¹) ME	10.07
全株青贮玉米 Silage corn	50.20	粗蛋白 CP	12.19
玉米芯 Corncob	2.20	粗脂肪 EE	0.61
精补料 Concentrate supplement ¹⁾	40.60	粗灰分 Ash	7.02
甜菜粕 Beet meal	2.00	中性洗涤纤维 NDF	43.71
小苏打 NaHCO ₃	0.5	酸性洗涤纤维 ADF	28.35
合计 Total	100	钙 Ca	0.78
		磷 P	0.42

¹⁾ 肉牛精补料提供豆粕、棉籽粕、菜籽粕、碳酸钙、磷酸氢钙、多种维生素、多种微量元素等;²⁾ 饲料营养成分为实测值,按照中国国家标准 GB/T 18823—2010 执行

¹⁾ The beef cattle concentrate supplement provides soybean meal, cottonseed meal, rapeseed meal, calcium carbonate, calcium hydrogen phosphate, multivitamins, and multiple trace minerals. ²⁾ The nutritional composition of the feed was determined experimentally in accordance with the Chinese National Standard GB/T 18823—2010

谷丙转氨酶、谷草转氨酶)与免疫指标(免疫球蛋白 A、免疫球蛋白 G、免疫球蛋白 M、白细胞介素 4、白细胞介素 6、白细胞介素 10、肿瘤坏死因子-α)在北京华英生物技术研究检测;血清抗氧化指标使用试剂盒测得,通过试剂盒说明书对丙二醛、超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、总抗氧化能力等 4 种抗氧化指标进行检测。

1.3.3 营养物质表观消化率 正饲期第 0、45、90 天采集饲料样品 500 g,样品经真空干燥箱 65℃ 恒温干燥 48 h 粉碎过 1 mm 标准分样筛后室温密封保存待检。正饲期第 90 天每头牛采集粪便样品 300 g 左右,混合均匀,样品经真空干燥箱 65℃ 恒温干燥 72 h,后置于室温环境 24 h 回潮,粉碎过 1 mm 标准分样筛后室温密封保存待检。饲料和粪便样品在陕西源海弘途农业科技有限公司测得,基于酸不溶灰分测定营养物质表观消化率。

$$\text{某营养物质表观消化率}(\%) = \frac{100 - 100 \times (C_f \times A_d) / (C_d \times A_f)}{100}$$

式中: C_f 为粪中某营养物质含量; A_d 为饲料中盐酸不溶灰分含量; C_d 为饲料中某营养物质含量; A_f 为粪中盐酸不溶灰分含量。

1.3.4 瘤胃发酵参数测定 正式试验第 90 天,晨饲前采用胃管式瘤胃液采集器采集瘤胃液 50 mL,经四层纱布过滤后,立即使用便携式 pH 计测定其 pH。随后将样品分装于 5 mL 离心管,置于 -20℃ 冰箱保存,氨态氮浓度参照冯宗慈和高民^[17]的方法测定,VFAs 浓度使用气相色谱仪(Agilent

7820A Gas Chromatograph System)测定(巴豆酸为内标)。

1.3.5 瘤胃微生物宏基因组测定 正式试验第 90 天,晨饲前采用胃管式瘤胃液采集器采集瘤胃液 50 mL,经四层纱布过滤后,将样品分装于 5 mL 离心管,置于 -80℃ 冰箱保存。瘤胃液样品送至深圳微科盟科技集团有限公司进行宏基因组测定,主要包括样本 DNA 提取与质检、目的片段扩增纯化、测序文库制备、上机测序、数据预处理等流程。首先通过序列质控与去宿主,确保质量分数大于 20% 的碱基所占比例高于 90%,质量分数大于 30% 的碱基所占比例高于 85%,之后进行测序。宏基因组数据在微科盟生科云平台(<https://www.bioincloud.tech/>)进行分析,利用 QIIME2.0 软件包,对测序片段进行 ASV 聚类,将 ASV 代表序列与 silva 数据库进行比对分析,获取相应的丰度信息,实现物种注释与可视化、物种统计与功能注释,完成样品间物种组成和功能组成差异的挖掘。

1.4 数据分析

试验数据使用 SPSS 27.0 软件进行分析,显著性分析采用单因素方差及 Duncan's 多重比较,结果数据以“平均值±标准差”表示, $P < 0.05$ 表示组间差异显著, $P < 0.01$ 表示组间差异极显著。

2 结果

2.1 添加甘草多糖对肉牛生长性能的影响

不同剂量 GCPs 对育肥肉牛生长性能的影响见

表2。由表2可知,0~45 d、0~90 d阶段,G30、G45组的平均日增重均显著高于G0组($P<0.05$),G15、G30、G45三组的干物质采食量均显著高于G0组($P<0.05$);0~90 d阶段,与G0组相比,G30、G45组的料重比显著下降($P<0.05$)。

表2 不同添加量甘草多糖对肉牛生长性能的影响

Table 2 Effects of different additions of GCPs on the growth performance of beef cattle

项目 Item	组别 Group			
	G0组 G0 group	G15组 G15 group	G30组 G30 group	G45组 G45 group
体重/kg BW				
0 d	617.40±23.27	618.20±18.91	616.60±13.68	618.60±22.14
45 d	680.60±28.97	690.60±18.49	694.20±23.38	697.80±21.57
90 d	729.60±29.34	742.60±16.48	750.40±25.15	754.20±24.28
平均日增重/(kg·d ⁻¹) ADG				
0-45 d	1.41±0.21 ^b	1.61±0.36 ^{ab}	1.72±0.32 ^a	1.76±0.19 ^a
45-90 d	1.09±0.18	1.15±0.27	1.25±0.23	1.25±0.16
0-90 d	1.25±0.13 ^b	1.38±0.21 ^{ab}	1.49±0.20 ^a	1.51±0.15 ^a
干物质采食量/(kg·d ⁻¹) TDMI				
0-45 d	16.06±1.22 ^b	16.81±1.25 ^a	16.74±1.14 ^a	16.79±1.21 ^a
45-90 d	13.83±1.30	14.48±1.22	14.37±1.25	14.45±1.17
0-90 d	15.04±1.68 ^b	15.74±1.69 ^a	15.65±1.67 ^a	15.72±1.67 ^a
料重比 F/G				
0-45 d	11.71±2.02	10.93±2.47	10.05±2.06	9.64±1.09
45-90 d	13.05±2.35	13.26±3.54	11.86±2.11	11.69±1.49
0-90 d	12.20±1.42 ^b	11.63±1.78 ^{ab}	10.72±1.56 ^a	10.53±1.10 ^a

同行肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$);肩标相同字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同

In the same row, values with different letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant differences ($P>0.05$). The same as below

2.2 添加甘草多糖对肉牛血液指标的影响

不同剂量GCPs对育肥肉牛血清生化指标的影响见表3。由表可知,添加GCPs对育肥肉牛血清TP、ALB、TC、TG、GLU、BUN、HDL、LDL水平均无显著性影响($P>0.05$);45 d、90 d,G30组的血清AST和ALT水平显著低于G0组($P<0.05$)。

不同剂量GCPs对育肥肉牛血清抗氧化指标的影响见表4。由表可知,添加GCPs可降低肉牛血清MDA及T-AOC水平,但差异不显著($P>0.05$);45 d时,与G0组比,G30、G45组GSH-Px水平有升高趋势($P=0.06$);G15、G30、G45组血清SOD水平显著提高($P<0.05$)。

不同剂量GCPs对育肥肉牛血清免疫指标的影响见表5。由表可知,添加GCPs对肉牛血清IgA、IgG、IgM、IL-4、IL-6、TNF- α 水平均无显著影响($P>0.05$);45d时,与G0组相比,G15、G30、G45组

血清IL-10水平显著提高($P<0.05$)。

2.3 添加甘草多糖对肉牛营养物质表观消化率的影响

不同剂量GCPs对育肥肉牛营养物质表观消化率的影响见表6。由表可知,添加GCPs组肉牛干物质、粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维表观消化率均高于G0组,但无显著差异($P>0.05$);与G0组相比,G30、G45组粗脂肪消化率显著升高($P<0.05$)。

2.4 添加甘草多糖对肉牛瘤胃发酵参数的影响

不同剂量GCPs对育肥肉牛瘤胃发酵参数的影响见表7。由表可知,添加GCPs对肉牛瘤胃pH、氨态氮、总挥发性脂肪酸、丙酸、异丁酸、戊酸、异戊酸、乙酸丙酸比均无显著性影响($P>0.05$);G15、G30组瘤胃乙酸比例显著低于G0、G45组($P<0.05$),G30组丁酸比例显著高于G0、G15、G45组($P<0.05$)。

表 3 不同添加量甘草多糖对肉牛血清生化指标的影响

Table 3 Effects of different additions of GCPs on serum biochemical indexes of beef cattle

项目 Item	组别 Group			
	G0组 G0 group	G15组 G15 group	G30组 G30 group	G45组 G45 group
总蛋白/(g·L ⁻¹) TP				
45 d	69.37±0.84	70.24±1.72	70.19±2.33	72.37±2.58
90 d	69.97±2.42	71.13±2.72	70.71±1.28	72.05±2.53
白蛋白/(g·L ⁻¹) ALB				
45 d	38.19±1.08	37.04±0.48	37.32±1.51	39.10±1.08
90 d	37.77±2.30	36.71±2.15	36.89±1.89	36.56±0.55
总胆固醇/(mmol·L ⁻¹) TC				
45 d	2.23±0.28	2.13±0.32	2.09±0.34	2.14±0.16
90 d	2.29±0.15	2.34±0.39	2.14±0.44	2.22±0.37
甘油三酯/(mmol·L ⁻¹) TG				
45 d	0.36±0.02	0.35±0.03	0.34±0.03	0.32±0.02
90 d	0.38±0.02	0.36±0.01	0.36±0.01	0.35±0.01
葡萄糖/(mmol·L ⁻¹) GLU				
45 d	3.97±0.33	3.49±0.11	3.88±0.29	3.89±0.09
90 d	3.13±0.13	2.99±0.36	2.78±0.32	2.94±0.48
尿素氮/(mg·dL ⁻¹) BUN				
45 d	12.04±1.35	10.67±1.62	9.51±1.24	11.30±1.00
90 d	12.37±1.38	13.04±1.73	10.20±1.70	11.52±0.78
高密度脂蛋白/(mmol·L ⁻¹) HDL				
45 d	1.94±0.13	1.98±0.17	1.86±0.27	1.91±0.17
90 d	2.05±0.06	2.03±0.16	2.00±0.29	2.06±0.07
低密度脂蛋白/(mmol·L ⁻¹) LDL				
45 d	0.53±0.12	0.55±0.04	0.51±0.02	0.53±0.06
90 d	0.56±0.04	0.53±0.10	0.53±0.02	0.57±0.06
谷丙转氨酶/(U·L ⁻¹) ALT				
45 d	37.54±1.68 ^a	34.49±1.05 ^{ab}	31.82±2.85 ^b	33.84±0.52 ^{ab}
90 d	42.60±0.33 ^a	41.25±1.94 ^{ab}	36.38±2.48 ^b	40.81±2.84 ^{ab}
谷草转氨酶/(U·L ⁻¹) AST				
45 d	108.56±1.77 ^a	99.10±6.37 ^{ab}	93.57±4.44 ^b	97.47±5.68 ^{ab}
90 d	119.34±8.41 ^a	112.62±6.32 ^{ab}	99.72±2.59 ^b	114.59±8.32 ^{ab}

2.5 添加甘草多糖对肉牛瘤胃微生物的影响

不同剂量GCPs对育肥肉牛瘤胃微生物数量的影响如图1所示。各组微生物群落物种分布存在一定的相似性,但同时也具有差异;基于样本物种丰度信息绘制的韦恩图显示了物种分布差异。分析结果显示,四组之间共有803个OTUs,而G0组、G15组、G30组和G45组分别有311个、309个、535个和503个特有的OTUs。

不同剂量GCPs对育肥肉牛瘤胃微生物 α 多样

性的影响如图2所示。与G0组相比,G30组的瘤胃微生物群落的Chao1丰富度指数显著提高($P<0.05$)。不同剂量的GCPs对育肥肉牛瘤胃微生物 β 多样性的影响如图3所示。运用主成分分析技术,对四个试验组育肥肉牛的瘤胃微生物 β 多样性进行多维标度分析和可视化表达,结果表明,G30组的大部分个体与G0组明显分离,说明G30组的微生物群落结构与G0组存在显著差异($P<0.05$)。

表 4 不同添加量甘草多糖对肉牛血清抗氧化指标的影响

Table 4 Effects of different additions of GCPs on serum antioxidant indexes of beef cattle

项目 Item	组别 Group			
	G0组 G0 group	G15组 G15 group	G30组 G30 group	G45组 G45 group
丙二醛/(nmol·mL ⁻¹) MDA				
45 d	13.75±2.25	13.23±1.42	12.70±0.91	12.76±0.46
90 d	12.83±0.70	12.57±0.75	12.00±1.67	12.17±0.91
超氧化物歧化酶/(U·mL ⁻¹) SOD				
45 d	17.35±0.10 ^b	18.81±0.83 ^a	19.25±0.69 ^a	18.92±0.43 ^a
90 d	18.38±0.73	19.74±1.28	20.39±1.24	20.74±1.62
谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL ⁻¹) GSH-Px				
45 d	254.32±22.48	269.72±15.37	285.69±14.84	287.27±13.48
90 d	275.05±17.75	288.53±20.63	297.40±27.64	294.89±26.73
总抗氧化能力/(μmol·mL ⁻¹) T-AOC				
45 d	0.70±0.02	0.73±0.03	0.74±0.04	0.73±0.06
90 d	0.72±0.04	0.75±0.03	0.76±0.03	0.74±0.05

表 5 不同添加量甘草多糖对肉牛血清免疫指标的影响

Table 5 Effects of different additions of GCPs on serum immune indexes of beef cattle

项目 Item	组别 Group			
	G0组 G0 group	G15组 G15 group	G30组 G30 group	G45组 G45 group
免疫球蛋白/(g·L ⁻¹) IgA				
45 d	2.39±0.50	2.55±0.46	3.03±0.83	3.03±0.38
90 d	2.14±0.60	2.27±0.10	2.56±0.07	2.60±0.10
免疫球蛋白/(g·L ⁻¹) IgG				
45 d	10.57±0.36	10.44±0.94	12.34±2.61	11.25±2.33
90 d	9.93±1.38	9.92±2.05	10.75±0.82	9.99±0.56
免疫球蛋白/(g·L ⁻¹) IgM				
45 d	0.78±0.20	0.91±0.21	0.97±0.22	0.96±0.11
90 d	0.74±0.07	0.84±0.08	0.84±0.15	0.75±0.10
白细胞介素 4/(pg·mL ⁻¹) IL-4				
45 d	6.31±0.32	6.53±0.06	6.75±0.18	6.25±0.59
90 d	4.33±0.33	4.16±0.17	4.41±0.15	4.49±0.42
白细胞介素 6/(pg·mL ⁻¹) IL-6				
45 d	146.14±3.38	141.42±3.84	143.29±3.35	144.86±1.09
90 d	176.17±4.27	173.97±9.42	173.97±4.29	171.18±4.12
白细胞介素 10/(pg·mL ⁻¹) IL-10				
45 d	13.04±0.61 ^b	13.86±0.21 ^a	14.04±0.35 ^a	14.06±0.39 ^a
90 d	9.36±0.20	9.43±0.25	9.64±0.59	9.98±0.35
肿瘤坏死因子/(pg·mL ⁻¹) TNF-α				
45 d	41.23±2.22	36.02±4.46	38.42±4.94	41.88±1.68
90 d	68.65±2.80	69.60±3.62	65.12±5.57	64.37±4.69

表6 不同添加量甘草多糖对肉牛表观消化率的影响

Table 6 Effects of different additions of GCPs on the apparent digestibility of beef cattle

%

项目 Item	组别 Group			
	G0组 G0 group	G15组 G15 group	G30组 G30 group	G45组 G45 group
干物质消化率 DMD	60.06±1.91	61.05±2.99	61.81±2.31	60.07±0.37
粗蛋白消化率 CPD	36.88±3.59	40.34±2.16	41.33±0.95	42.23±2.66
粗脂肪消化率 EED	40.21±4.48 ^b	42.55±1.79 ^{ab}	47.99±2.25 ^a	47.04±3.27 ^a
中性洗涤纤维消化率 NDFD	51.84±3.40	54.59±1.63	56.83±4.02	52.22±3.88
酸性洗涤纤维消化率 ADFD	35.71±0.32	38.15±1.04	38.91±1.03	36.73±2.54

表7 不同添加量甘草多糖对肉牛瘤胃发酵参数的影响

Table 7 Effects of different additions of GCPs on the rumen fermentation parameters of beef cattle

项目 Item	组别 Group			
	G0组 G0 group	G15组 G15 group	G30组 G30 group	G45组 G45 group
pH	6.70±0.02	6.55±0.17	6.56±0.06	6.62±0.03
氨态氮/(mg·dL ⁻¹) NH ₃ -N	12.28±1.54	12.27±1.11	10.31±1.58	10.98±1.13
总挥发性脂肪酸/(mmol·L ⁻¹) TVFAs	66.54±8.25	79.38±6.05	73.72±8.90	67.19±8.99
乙酸/% Acetic Acids	69.60±0.58 ^a	67.15±0.97 ^b	65.92±1.07 ^b	69.19±1.91 ^a
丙酸/% Propionic Acid	15.60±1.95	15.73±1.41	16.05±0.90	15.41±1.69
丁酸/% Butyric Acid	10.98±1.24 ^b	11.80±0.88 ^b	13.71±0.69 ^a	10.95±0.82 ^b
异丁酸/% Isobutyric Acid	1.52±0.25	1.55±0.41	1.19±0.17	1.56±0.16
戊酸/% Valeric Acid	2.31±0.35	2.31±0.78	1.67±0.21	2.56±0.24
异戊酸/% Isovaleric Acid	0.74±0.04	0.78±0.16	0.78±0.06	0.81±0.10
乙酸丙酸比 A:P	4.51±0.56	4.30±0.40	4.12±0.25	4.54±0.66

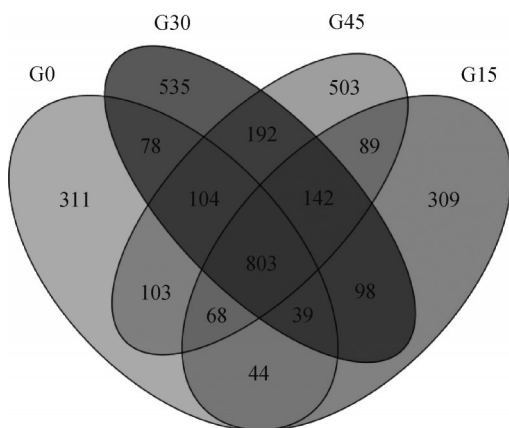


图1 韦恩图

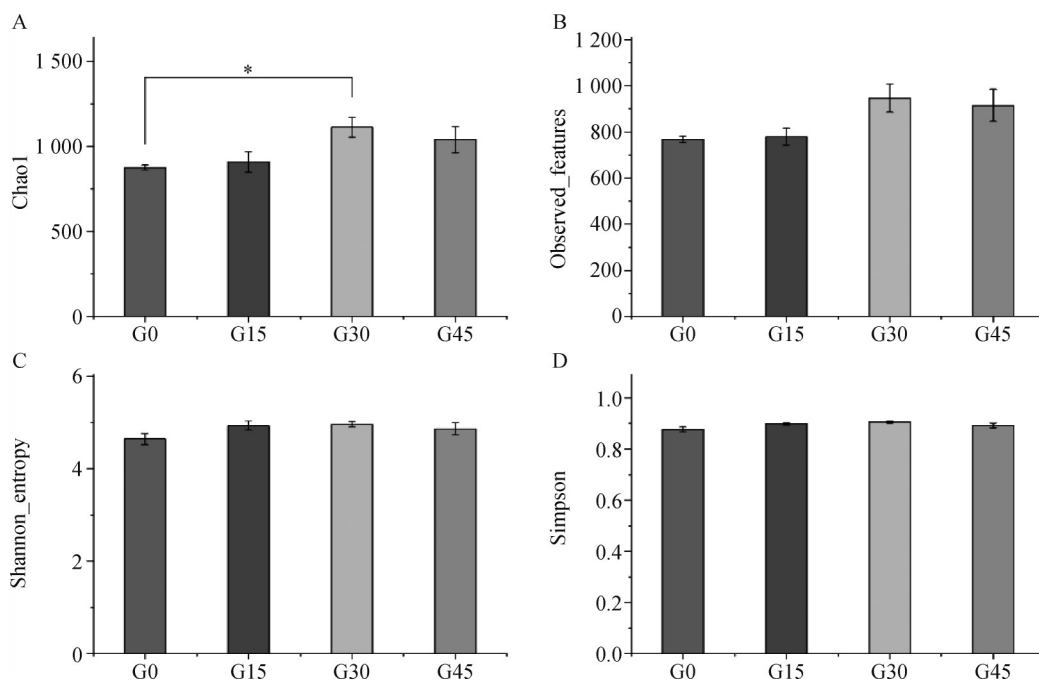
Fig. 1 Venn diagram

各处理组西门塔尔育肥肉牛瘤胃微生物群落组成分析结果如图4所示。在门分类水平上,厚壁菌门(Bacillota)和拟杆菌门(Bacteroidota)相对丰度占主导地位。在属分类水平上,普雷沃氏菌属(*Prevotella*)和甲烷短杆菌属(*Methanobrevibacter*)

相对丰度占主导地位。

不同剂量GCPs对西门塔尔育肥肉牛门分类水平瘤胃微生物的影响如图5所示。结果显示,G30组假单胞菌门(*Pseudomonadota*)、纤维杆菌门(*Fibrobacterota*)相对丰度显著高于G0组和G15组($P<0.05$);G30组厚壁菌门(*Bacillota*)的相对丰度则显著低于其它三组,而拟杆菌门(*Bacteroidota*)相对丰度、拟杆菌门与厚壁菌门比值(*Bacteroidota*/*Bacillota*)显著高于其它三组($P<0.05$)。不同剂量GCPs对西门塔尔育肥肉牛属分类水平瘤胃微生物的影响如图6所示。G30组的普雷沃氏菌属(*Prevotella*)相对丰度显著高于其它三组($P<0.05$),纤维杆菌属(*Fibrobacter*)相对丰度显著高于G0组和G15组($P<0.05$)。

KEGG pathway level3功能注释结果表明,瘤胃微生物群落涉及326个代谢功能。丰度排名前15的功能类别(图7A)主要富集于氨基酸代谢与遗传功能。在不同处理组中,G30组差异代谢通路主要



A. Chao1 指数; B. Observed-features 指数; C. Shannon 指数; D. Simpson 指数。* 表示组间差异具有统计学显著性 ($P < 0.05$), ** 表示组间差异具有高度统计学显著性 ($P < 0.01$), 未标注表示组间差异无统计学差异 ($P > 0.05$), 下图同

A. Chao1 index; B. Observed-features index; C. Shannon index; D. Simpson index. * indicates a statistically significant difference between groups ($P < 0.05$), ** indicates a highly statistically significant difference between groups ($P < 0.01$), and no marking indicates no statistically significant difference between groups ($P > 0.05$). The same applies to the following figure

图2 甘草多糖对育肥肉牛瘤胃细菌多样性的影响

Fig. 2 Effect of GCPs on bacterial diversity in rumen of fattening beef cattle

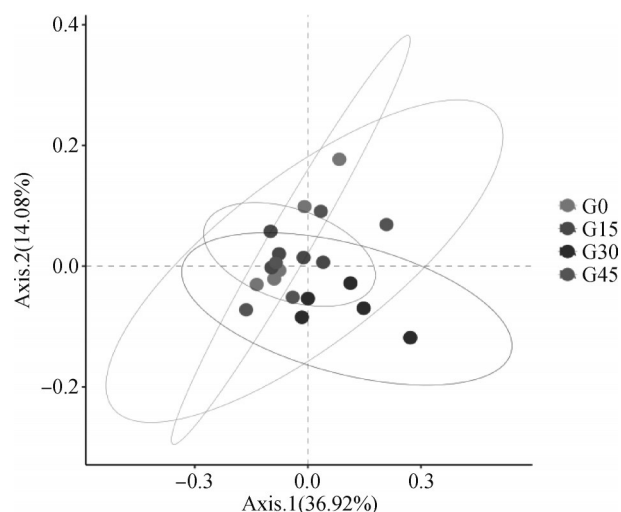


图3 瘤胃细菌主坐标分析图

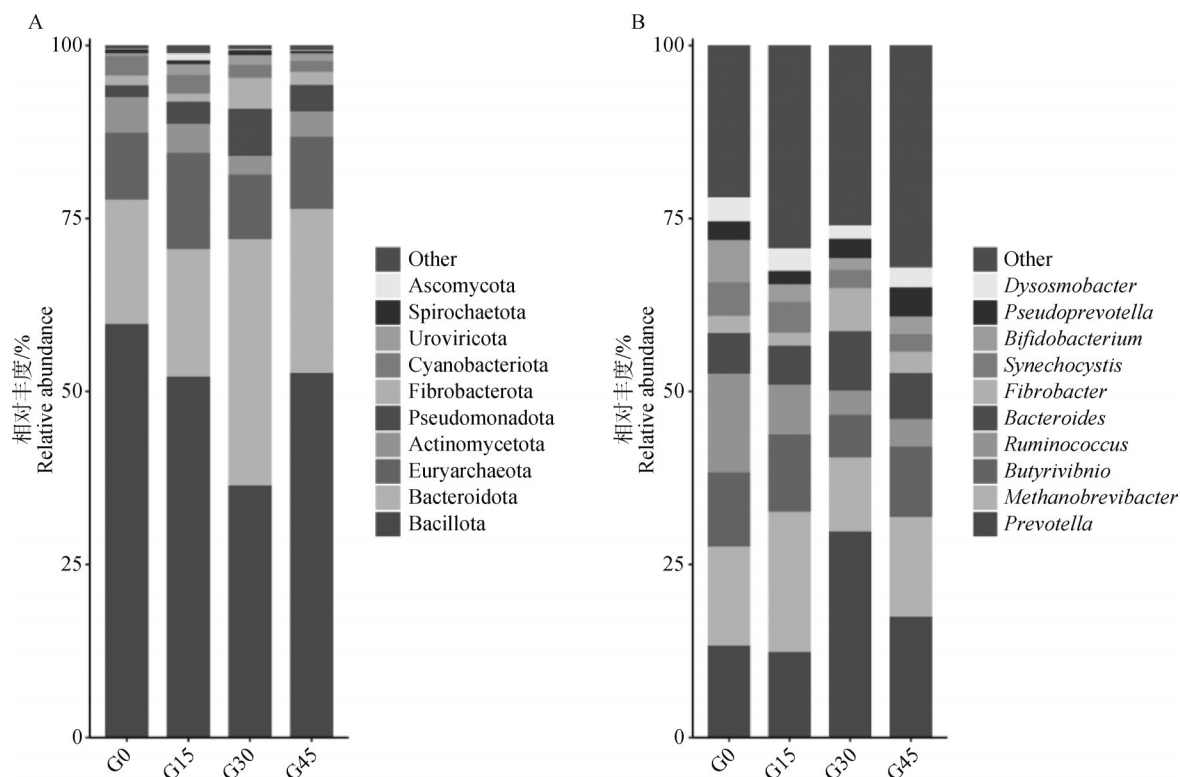
Fig. 3 PCoA diagram of rumen flora

集中在牛磺酸和次牛磺酸代谢 (Taurine and taurine metabolism)、丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢 (Alanine, aspartate and glutamate metabolism)、脂肪酸生物合成 (Fatty acid biosynthesis); G15 组差异代谢通路主要集中在酮体合成与降解 (Synthesis

and degradation of ketonebodies)、硝基甲苯降解 (Nitrotoluene degradation); G45 组差异代谢通路主要集中在 C5-支链二元酸代谢 (C5-Branched dibasic acid metabolism); G0 组差异代谢通路主要集中在链霉素生物合成 (Streptomycin biosynthesis)、阿卡波糖和有效霉素生物合成 (Acarbose and validamycin biosynthesis)。

3 讨论

在集约化生产中,生长性能是衡量畜禽生产效益的核心指标,甘草及其提取物已经被证实对动物生长具有促进作用^[18]。有研究指出,在哺乳犊牛常乳中添加 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 甘草提取物可以显著提高犊牛平均日增重^[19]。此外,在家禽上的相关研究报道显示,饮水中添加甘草提取物可以作为肉鸡饲料中抗生素促生长剂的有效替代物^[20];甘草通过促进家禽内脏器官发育而对其生长性能产生积极影响,日粮中添加 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 光果甘草显著提高了肉鸡生长性能^[21]。本研究中,添加 $30, 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ BW}$ GCPs 能

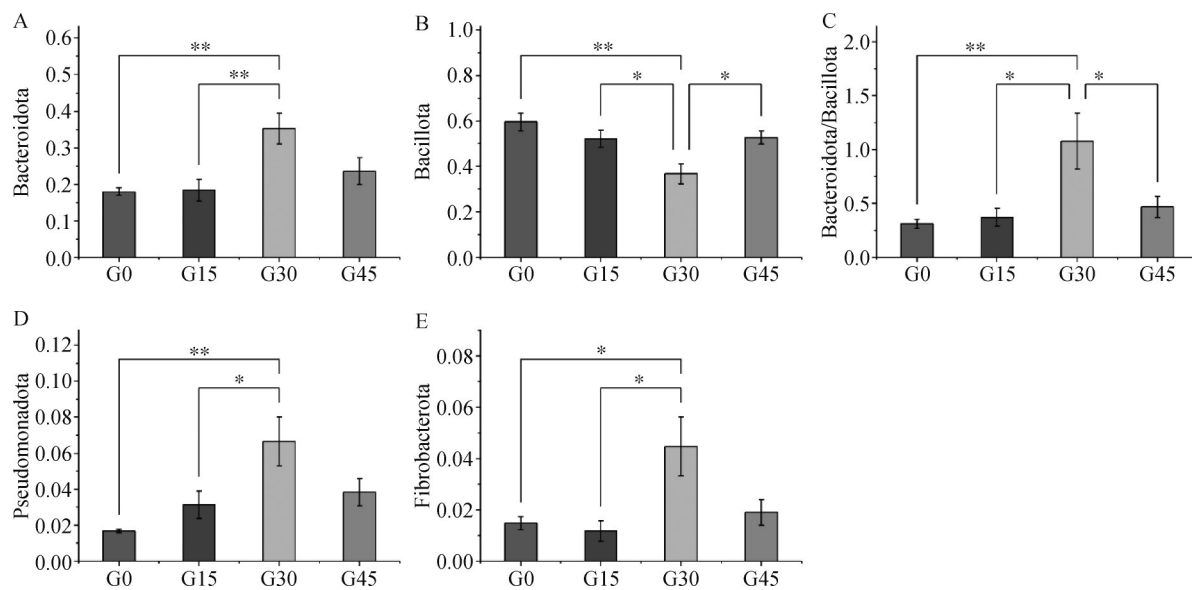


A. 门分类水平; B. 属分类水平

A. Phylum classification level; B. Genus classification level

图4 甘草多糖对育肥肉牛瘤胃微生物组成的影响

Fig. 4 Effect of GCPs on rumen microbial composition of fattening beef cattle



A. 拟杆菌门; B. 厚壁菌门; C. 拟杆菌门/厚壁菌门; D. 假单胞菌门; E. 纤维杆菌门

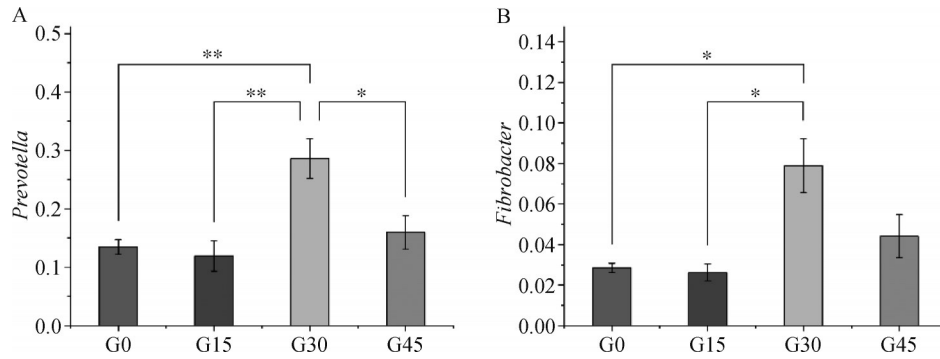
A. Bacteroidetes; B. Bacillota; C. Bacteroidetes/Bacillota; D. Pseudomonadota; E. Fibrobacterota

图5 甘草多糖对育肥肉牛瘤胃门水平差异微生物相对丰度的影响

Fig. 5 Effect of GCPs on the relative abundance of microorganisms at the rumen phylum level of fattening beef cattle

够显著增加育肥肉牛平均日增重与干物质采食量, 可能是由于GCPs具有天然的甜味和特殊的香气,

能够提升饲料风味和口感^[22], 提高了日粮适口性; 同时GCPs通过刺激唾液腺和消化腺分泌, 有助于



A. 普雷沃氏菌属; B. 纤维杆菌属

A. *Prevotella*; B. *Fibrobacter*

图6 甘草多糖对育肥肉牛瘤胃属水平差异微生物相对丰度的影响

Fig. 6 Effect of GCPs on the relative abundance of microorganisms at the rumen genus level of fattening beef cattle

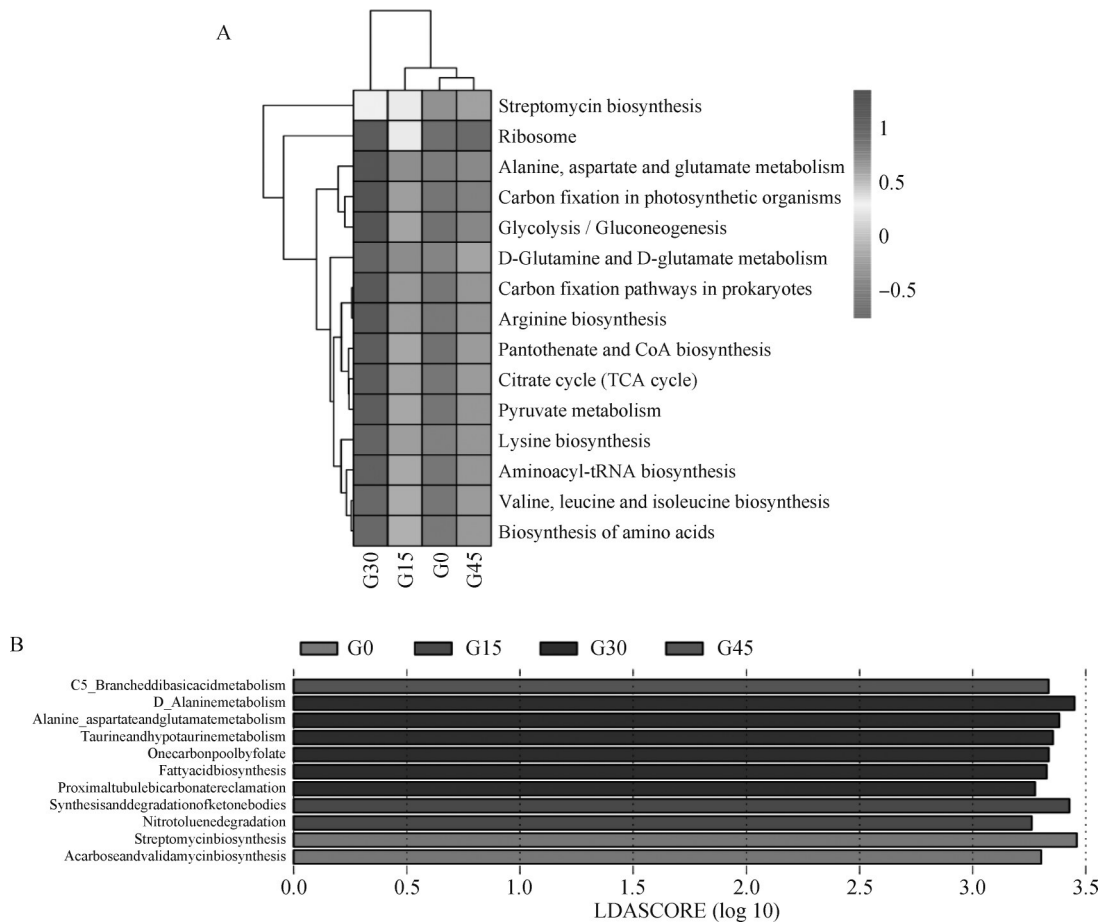


图7 甘草多糖对育肥肉牛瘤胃微生物代谢通路的影响

Fig. 7 Effect of GCPs on rumen microbial metabolic pathway in fattening beef cattle

饲料消化^[23]。Zhang等^[24]研究发现,在断奶仔猪日粮中添加GCPs可以显著提高仔猪日增重、干物质采食量,降低料重比,这与本研究的结果一致:G30、G45组料重比显著下降,分别降低了12.13%与13.69%,提高了饲料报酬。综上,饲喂GCPs对育肥肉牛生长发育具有正向积极作用。在畜牧业生

产中,生长性能的提高与经济效益直接相关^[25]。综合各项指标表现,GCPs最适添加量为30 mg·kg⁻¹ BW。

血清生化指标的动态变化可以反映畜禽对营养物质的消化吸收水平、健康状况以及某些组织器官功能变化^[26]。ALT和AST是衡量肝健康的标志

物^[27],这两种转氨酶在肝组织中含量丰富,当肝细胞膜完整性遭到破坏时,会大量逸出至外周血液中,血液中 ALT、AST 含量升高提示肝功能异常^[28]。45 d 及 90 d, G30 组血清 ALT、AST 活性均显著低于 G0 组,说明 GCPs 可以缓解肝细胞损伤。育肥后期由于机体代谢活动增强与饲养管理条件变化,育肥牛机体氧化应激增强^[29];GCPs 通过减少自由基产生,抑制一氧化氮合成酶活性进而减少一氧化氮生成等途径,减轻对肝细胞膜的损伤,促进细胞膜结构修复,保障肝细胞正常代谢和功能^[30]。

在生长代谢过程中,动物细胞产生的活性氧(ROS)会参与各种细胞生物学过程^[31];过量 ROS 会使机体内氧化和抗氧化状态失衡,导致氧化应激,损害细胞组分(如脂质、蛋白质等),使动物机体更容易感染疾病^[32];SOD、GSH-Px 等自由基清除酶是抵御机体氧化损伤体系的重要组成^[33]。SOD 是一种存在于生物体内的抗氧化金属酶,通过歧化作用来消除自由基^[34];GSH-Px 存在于哺乳动物细胞质和线粒体基质中,通过还原过氧化氢,防止细胞氧化损伤^[35]。GCPs 结构中包含多个羟基与糖苷键,能够有效清除自由基,螯合金属离子,提高抗氧化酶活性^[36];研究发现,GCPs 能够显著提高肝及血液中 SOD、GSH-Px 等抗氧化酶活性^[37-38],这与本研究结果相似:饲喂 GCPs 提高了育肥牛 45 d 血清 SOD、GSH-Px 含量,促进机体抗氧化能力提升。

免疫系统通过多种调节机制减少病原体入侵与宿主损伤,以 IL-10 为代表的抗炎反应是其中的一种机制^[39]。过度的炎症会引起对宿主有害的全身代谢紊乱,抗炎机制通过调节促炎因子与抗炎因子的产生,维持和恢复组织稳态^[40]。IL-10 作为重要的抗炎细胞因子,在宿主免疫调节和防御系统中起重要作用^[41],研究表明敲除 IL-10 相关基因的小鼠发生结肠炎概率显著上升,表明其在体内控制炎症的关键作用^[42];IL-10 缺乏或异常表达会增强机体炎症反应,导致多种自身免疫性疾病发生,IL-10 主要通过抑制促炎细胞因子的表达,发挥下调炎症反应的作用^[43]。Ji 等^[44]研究发现,给肉鸡饲喂 GCPs 可以显著降低血清促炎因子水平,增加抗炎细胞因子表达;据报道,GCPs 主要通过调控 MAPK 信号转导通路以及抑制炎症关键因子 NF- κ B 的转录活性,发挥其抗炎特性^[45]。育肥肉牛育肥后期常采用高碳水化合物或高脂饲料以实现快速增重,但高能量饲料过量摄入会引发代谢紊乱,导致动物机

体炎症水平上升^[46]。本研究中,添加 GCPs 显著增加了 45 d 血清 IL-10 水平,同时血清促炎细胞因子 IL-6、TNF- α 水平有下调趋势,表明 GCPs 能够增强抗炎因子在动物机体内的表达,增强机体免疫能力,缓解育肥后期高能量饲料补充的负面效应。

研究表明,中草药多糖能够提高育肥牛的生长性能,这可能是通过增加营养物质的消化率来实现的^[47]。有研究发现,给断奶羔羊饲喂黄芪多糖显著提高了干物质、粗蛋白、粗脂肪等营养物质的表观消化率^[48]。张风荣等^[49]研究发现,在肉兔日粮中添加复合植物多糖提高了粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗脂肪的养分表观消化率。本研究中,G30、G45 组粗脂肪消化率显著高于 G0 组。有研究对 GCPs 在模拟唾液-胃液-肠液消化中的作用机制进行分析,发现多糖在消化过程中部分降解,还原糖含量显著升高,表明 GCPs 在消化过程中具有一定的稳定性,可能在肠道中发挥作用,从而影响脂肪消化吸收^[50]。

瘤胃是反刍动物消化系统中的核心器官,通过微生物发酵、营养物质转化、缓冲系统等维持机体健康。瘤胃 pH 是影响瘤胃内环境稳态的关键因素,适宜 pH 为 6.2~7.0 之间;当 pH 处于 6.0 以下时,原虫大量减少,对 pH 值变化敏感的纤维分解菌数量显著降低;当 pH 低于 5.5 时,会导致瘤胃酸中毒^[51]。本研究中,各组育肥肉牛的瘤胃 pH 值均保持在正常范围内,这表明 GCPs 并未对肉牛瘤胃的发酵环境产生不良影响。VFAs 是反刍动物瘤胃代谢碳水化合物的主要产物,也是其体内重要的能量来源^[52]。VFAs 的组成和比例是影响瘤胃内环境的重要因素。本研究发现,G15、G30 组乙酸比例显著低于 G0 组,G30 组丁酸比例显著高于 G0 组。研究表明,在高能量需求条件下,反刍动物代谢会优先利用能量密度更高的物质,以满足自身生长和繁殖的能量需求。丁酸代谢途径产能高于乙酸代谢途径产能^[53],在中草药多糖的影响下,反刍动物瘤胃丁酸比例升高,以满足能量需求^[54],这与本试验的研究结果一致。甘草多糖通过提高瘤胃丁酸比例,降低乙酸比例,进而提高能量利用效率,满足育肥后期牛的高能量需求。同时 GCPs 添加可能会降低甲烷产生,因为乙酸生成过程中会产生氢气,作为产甲烷菌的电子供体参与甲烷合成,甲烷生成增多会降低反刍动物饲料能量的利用效率^[55]。此外,瘤胃内丁酸比例的增高与纤维分解菌存在密切的协

同关系,可以促进纤维素分解菌活性,同时具有抑制有害菌生长的功能^[56]。在本研究中,添加中剂量GCPs可以通过改变瘤胃VFAs生成模式,促进反刍动物瘤胃发酵。

瘤胃微生物群落是反刍动物消化过程中复杂且重要的生态系统,具有营养物质消化吸收、免疫调节、维护肠道屏障等作用,在调节反刍动物健康方面起着重要的作用^[57]。 α 多样性反映了微生物群落的物种丰富度和多样性^[58],本研究发现G30组、G45组瘤胃微生物群落Chao1指数显著增加,说明添加GCPs可以优化瘤胃微生物生态系统,缓解环境变化与应激因素对机体的影响,维持瘤胃微生物功能稳定性。 β 多样性反映了微生物群落的结构差异^[59]。研究发现,给肉鸡饲喂GCPs可改变其肠道菌群结构^[60],与本研究结果相似:G30组 β 多样性与G0组具有显著差异,GCPs影响育肥肉牛瘤胃微生物菌群结构。

在本研究中,拟杆菌门和厚壁菌门是普雷沃氏菌属为育肥肉牛瘤胃的核心微生物菌门,这与Cui等^[61]的研究结果一致。拟杆菌门细菌在消化复杂多糖以及调节肠道免疫反应中起到关键作用,可以维持机体健康和防止病原体入侵^[62];厚壁菌门丰度增加会导致有益菌减少、瘤胃菌群失调,从而引起代谢紊乱^[63]。拟杆菌门/厚壁菌门与宿主获能水平显著相关,同时该值增高有利于降低心血管疾病和炎症的发生率^[64]。本研究发现,与G0组相比,G30组拟杆菌门相对丰度显著升高,厚壁菌门相对丰度显著降低,中剂量GCPs摄入后,厚壁菌门丰度下调归因于拟杆菌门丰度增加,GCPs通过调节瘤胃细菌种类及丰度改善动物健康状况;日粮中添加中剂量GCPs显著增加了拟杆菌门与厚壁菌门的比值,这与G30组粗脂肪表观消化率、饲料效率以及血清免疫指标显著增高结果相对应。在瘤胃中,假单胞菌门和纤维杆菌门能够通过分泌多种酶降解植物细胞壁多糖,如纤维素、半纤维素等,从而对瘤胃挥发性脂肪酸的产生起到关键作用^[65]。本研究中,G30组假单胞菌门和纤维杆菌门相对丰度均显著高于G0、G15两组,表明GCPs通过调节瘤胃菌群丰度影响机体纤维素利用率与瘤胃代谢状况。

在本研究中,普雷沃氏菌属为育肥肉牛瘤胃的核心微生物菌属,是隶属于拟杆菌门的一种有益菌属,具有促生长作用,参与多糖降解与短链脂肪酸合成,与瘤胃发酵指标中的乙酸含量呈显著负相

关^[66-67]。有研究表明,普雷沃氏菌属发酵碳水化合物过程中会产生高浓度琥珀酸,抑制拟杆菌生长,从而降低乙酸生成^[68]。本试验中,G30组普雷沃氏菌属相对丰度显著高于G0组,这与G30组瘤胃发酵指标中乙酸比例显著下降结果一致。纤维杆菌属是纤维杆菌门中的一种有益菌属,在瘤胃生态系统中对纤维素的降解起重要作用,与瘤胃发酵指标中的丁酸含量呈显著正相关^[69]。研究发现,纤维分解菌(如纤维杆菌)与丁酸生成菌在瘤胃中具有协同作用,丁酸生成菌能够利用纤维分解菌产生的中间产物(如糖类)进行发酵,最终生成丁酸;丁酸增加可以改变瘤胃微生物的组成,使纤维素分解菌相对丰度增加^[70]。这与本研究结果一致:G30组瘤胃纤维杆菌属相对丰度显著高于G0组,这与G30组瘤胃发酵指标中丁酸比例显著提高结果一致。中剂量GCPs通过改变瘤胃菌属,影响营养物质消化吸收与机体代谢。

对细菌群落进行KEGG-Pathway Level 3水平的功能富集分析发现,各组富集程度最高的功能大多数与氨基酸代谢相关(图7-A)。微生物功能差异分析发现,G30组差异代谢通路主要集中在氨基酸代谢(牛磺酸和次牛磺酸代谢,丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢)以及脂肪酸生物合成。牛磺酸和次牛磺酸在代谢过程中发挥抗氧化以及减少炎症反应等多种生理功能^[71],这一作用机制与G30组血清抗氧化水平和免疫能力显著提高结果一致。丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢以及脂肪酸生物合成过程主要通过合成代谢中间体,为机体的能量代谢和储存提供重要支持^[72-73]。研究发现,甘草能够促进氨基酸代谢,为脂肪酸的合成和代谢提供前体物质,从而间接提高脂肪的消化吸收效率^[74]。这一发现与本研究结果一致:G30组粗脂肪表观消化率显著高于G0组。G15组差异代谢通路主要集中在酮体合成与降解和硝基甲苯降解。酮体的合成与降解是脂肪代谢的重要组成部分,在供能和代谢过程中发挥着关键作用。研究表明,瘤胃微生物通过将硝基化合物还原为胺类物质,减少了其对瘤胃微生物的毒性,同时硝基化合物的代谢产物(如丙酸和丁酸)可以被瘤胃微生物利用,同时减少甲烷排放^[75]。G45组差异代谢通路主要集中在C5-支链二元酸代谢。研究表明,瘤胃微生物能够通过代谢C5支链二元酸过程获能,调节VFAs生成,有利于维持瘤胃内环境稳定^[76]。这些结果表明,不同添加剂量GCPs

对瘤胃微生物的功能代谢存在显著差异,且这些差异通路可能与宿主的代谢调节和健康状态密切相关。

4 结 论

本研究发现,日粮中添加 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ BW}$ 甘草多糖可提高西门塔尔育肥肉牛的生长性能、养分表观消化率、机体抗氧化水平与免疫能力,并发挥保肝功效。此外, $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ BW}$ 甘草多糖还能改变瘤胃挥发性脂肪酸组成,显著提高瘤胃微生物多样性及有益菌相对丰度,促进氨基酸代谢与脂肪酸合成相关功能。

参考文献 (References):

- [1] 刘茜,曹书铭,王恒. 食品安全要求下的牛肉绿色消费与品质需求[J]. 食品安全导刊,2022(9):167-169.
LIU X, CAO S M, WANG H. Green consumption and quality demand of beef under food safety requirements [J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(9):167-169. (in Chinese)
- [2] 谭春萍,李芳芳,黄裕坚,等. 日粮添加黄芪多糖对肉牛生长性能、免疫及抗氧化功能的影响[J]. 中国饲料,2024,(20):19-22.
TAN C P, LI F F, HUANG Y J. Effects of dietary astragalus polysaccharide supplementation on growth performance, immunity and antioxidant function of beef cattle [J]. *China Feed*, 2024,(20):19-22. (in Chinese)
- [3] 王燕,侯鹏霞,李丹,等. 酵母多糖对育肥牛屠宰性能和肉质风味的影响[J]. 动物营养学报,2023,35(10):6452-6461.
WANG Y, HOU P X, LI D. Effects of Yeast Polysaccharides on Slaughter Performance and Meat Quality and Flavor of Finishing Cattle [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35 (10): 6452-6461. (in Chinese)
- [4] LIU C, CUI Y, PI F, et al. Extraction, purification, structural characteristics, biological activities and pharmacological applications of acemannan, a polysaccharide from aloe vera: A Review [J]. *Molecules*, 2019, 24(8): 1554.
- [5] GHOSH R, BRYANT D L, FARONE A L. Panax quinquefolius (North American Ginseng) polysaccharides as immunomodulators: current research status and future directions [J]. *Molecules*, 2020, 25(24):5854.
- [6] TZIANABOS A O. Polysaccharide immunomodulators as therapeutic agents: structural aspects and biologic function [J]. *Clin Microbiol Rev*, 2000, 13(4): 523-533.
- [7] 邢林林,张月,姜子昕,等. 植物多糖对畜禽养殖的影响[J]. 中国畜牧业,2022(14):44-45.
XING L L, ZHANG Y, JIANG Z X. Effects of plant polysaccharides on livestock and poultry breeding [J]. *China Animal Industry*, 2022(14):44-45. (in Chinese)
- [8] 刘宇倡,秦炜赓,吴白乙拉,等. 甘草及其提取物在畜禽生产中的应用研究进展[J]. 中国饲料,2024(13):70-75.
LIU Y C, QIN W Z, WU B Y L, et al. Research progress on the application of licorice and its extracts in livestock and poultry production [J]. *China Feed*, 2024 (13):70-75. (in Chinese)
- [9] ALAGAWANY M, ELNESR S S, FARAG M R, et al. Use of licorice (*Glycyrrhiza glabra*) herb as a feed additive in poultry: current knowledge and prospects [J]. *Animals (Basel)*, 2019, 9(8):536.
- [10] 杨媛媛,包丽娜,吴树妍,等. 药用植物提取物对动物免疫功能影响的研究进展[J]. 天然产物研究与开发,2025,37(1):168-181.
YANG Y Y, BAO L N, WU S Y, et al. Research progress on the effects of medicinal plant extracts on animal immune function [J]. *Natural Product Research and Development*, 2025, 37(1):168-181. (in Chinese)
- [11] SHEN H, ZENG G, SUN B, et al. A polysaccharide from glycyrrhiza inflata licorice inhibits proliferation of human oral cancer cells by inducing apoptosis via mitochondrial pathway [J]. *Tumour Biol*, 2015, 36(6): 4825-4831.
- [12] CHEN J, LI W C, GU X L. Optimized extraction, preliminary characterization, and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Glycyrrhiza uralensis* fisch [J]. *Medical Science Monitor*, 2017, 23: 1783-1791.
- [13] 张梦圆,朱晓庆,谷新利,等. 硒化乌拉尔甘草多糖和乌拉尔甘草多糖对单核细胞增生李斯特菌抗菌活性的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医,2023(11):110-115.
ZHANG M Y, ZHU X Q, GU X L, et al. Study on the antibacterial activity of selenizing *Glycyrrhiza uralensis* polysaccharide and *Glycyrrhiza uralensis* polysaccharide against *Listeria monocytogenes* [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2023(11): 110-115. (in Chinese)
- [14] AIPIRE A, MAHABATI M, CAI S, et al. The immunostimulatory activity of polysaccharides from

- Glycyrrhiza uralensis*[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e8294.
- [15] KATAYAMA M, FUKUDA T, OKAMURA T, et al. Effect of dietary addition of seaweed and licorice on the immune performance of pigs[J]. *Anim Sci J*, 2011, 82(2): 274-281.
- [16] WU Y, LI N, ZHANG T, et al. Glycyrrhiza polysaccharides can improve and prolong the response of chickens to the Newcastle disease vaccine[J]. *Poult Sci*, 2022, 101(1): 101549.
- [17] 冯宗慈, 高 民. 通过比色测定瘤胃液氨氮含量方法的改进[J]. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(Z1): 37.
- FENG Z C, GAO M. Improvement of the colorimetric method for determining ammonia nitrogen content in rumen fluid[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, 31(Z1): 37. (in Chinese)
- [18] 尹胜港, 尤 婷, 汤加勇, 等. 甘草提取物的生物学功能及其在畜禽生产中的应用[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(7): 3713-3718.
- YIN S G, YOU T, TANG J Y, et al. Licorice extract: biological function and application in livestock and poultry production [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(7): 3713-3718. (in Chinese)
- [19] 屈平平, 李 涛, 张雪丽, 等. 甘草提取物对哺乳犊牛生长性能、腹泻率及血液指标的影响[J]. *饲料研究*, 2024, 47(24): 5-10.
- QU P P, LI T, ZHANG X L, et al. Effects of licorice extract on growth performance, diarrhea rate, and blood indexes of suckling calves[J]. *Feed Research*, 2024, 47(24): 5-10. (in Chinese)
- [20] NASER M, SHAHAB G, MAHMOOD H. Drinking water supplementation of licorice (*Glycyrrhiza glabra* L. root) extract as an alternative to in-feed antibiotic growth promoter in broiler chickens [J]. *GSC Biol Pharm Sci*, 2017, 1: 20-28.
- [21] ALAGAWANY M, ELNESR S S, FARAG M R, et al. Use of licorice (*Glycyrrhiza glabra*) herb as a feed additive in poultry: current knowledge and prospects[J]. *Animals (Basel)*, 2019, 9(8): 536.
- [22] 郭泰春. 甘草次酸衍生物抗自由基活性研究及甘草产品工业化设计[D]. 兰州: 兰州理工大学. 2016.
- GUO T C. Research on anti-radical activities of Glycyrrhetic acid derivatives and industrial design of licorice products [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [23] 李世传, 闫 冰. 甘草的研究进展及其在饲料生产中的应用[J]. *饲料与畜牧*, 2014(2): 28-29.
- LI S C, YAN B. Research Progress on *Glycyrrhiza uralensis* and its application in feed production [J]. *Animal Agriculture*, 2014(2): 28-29. (in Chinese)
- [24] ZHANG C, LI C, ZHAO P, et al. Effects of dietary Glycyrrhiza polysaccharide supplementation on growth performance, intestinal antioxidants, immunity and microbiota in weaned piglets[J]. *Anim Biotechnol*, 2023, 34(7): 2273-2284.
- [25] COPPING K J, CALLAGHAN M J, GEESINK G H, et al. Periconception and first trimester diet modifies appetite, hypothalamic gene expression, and carcass traits in bulls [J]. *Front Genet*, 2021, 12: 720242.
- [26] ZHANG C, LA Y, MA X, et al. The effects of different doses of compound enzyme preparations on the production performance, meat quality and rumen microorganisms of yak were studied by metagenomics and transcriptomics [J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1491551.
- [27] 魏 栋, 郭晓彤, 华文浩, 等. 不同给药途径注射用益气复脉(冻干)对心肌梗死大鼠的药效作用对比研究[J]. *药物评价研究*, 2025, 48(2): 317-327.
- WEI D, GUO X T, HUA W H, et al. Comparative study on pharmacodynamic effects of Yiqi Fumai Lyophilized injection by different administration routes on rats with myocardial infarction [J]. *Drug Evaluation Research*, 2025, 48(2): 317-327. (in Chinese)
- [28] REICHLING J J, KAPLAN M M. Clinical use of serum enzymes in liver disease[J]. *Dig Dis Sci*, 1988, 33(12): 1601-1614.
- [29] 雷智琦, 张 萱, 柳 越, 等. 氧化应激对围产期奶牛及犊牛的影响研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2022, 58(2): 13-18.
- LEI Z Q, ZHANG X, LIU Y, et al. Research progress on the effects of oxidative stress on perinatal dairy cows and calves[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2022, 58(2): 13-18. (in Chinese)
- [30] 韩维维, 钟 晴, 张 蓉, 等. 甘草有效成分及其作用机制研究进展[J]. *生命的化学*, 2023, 43(12): 1956-1962.
- HAN W W, ZHONG Q, ZHANG R, et al. Research progress of active constituents and their mechanism of action in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch [J]. *Chemistry of Life*, 2023, 43(12): 1956-1962. (in Chinese)
- [31] LASSÈGUE B, SAN MARTÍN A, GRIENDLING K K. Biochemistry, physiology, and pathophysiology of NADPH oxidases in the cardiovascular system [J]. *Circ Res*, 2012, 110(10): 1364-1390.

- [32] SCHIEBER M, CHANDEL N S. ROS function in redox signaling and oxidative stress [J]. *Curr Biol*, 2014, 24(10):R453-462.
- [33] 王典, 周克, 李颖丽, 等. 维生素C的功能及其在奶牛养殖中的应用[J]. 中国奶牛, 2023(5):4-8.
WANG D, ZHOU K, LI Y L, et al. The function of Vitamin C and its application in dairy breeding [J]. *China Dairy Cattle*, 2023(5):4-8. (in Chinese)
- [34] BATINIC-HABERLE I, TOVMASYAN A, ROBERTS E R H, et al. SOD therapeutics: latest insights into their structure-activity relationships and impact on the cellular redox-based signaling pathways [J]. *Antioxid Redox Signal*, 2014, 20(15):2372-2415.
- [35] XU X L, WU S J, QI S Y, et al. Increasing GSH-Px activity and activating wnt pathway promote fine wool growth in fgf5-edited sheep [J]. *Cells*, 2024, 13(11):985.
- [36] 杨玲, 汪河滨, 罗锋. 甘草多糖清除自由基活性的研究[J]. 塔里木大学学报, 2007(1):1-3.
YANG L, WANG H B, LUO F. Study on scavenging free radical activity with polysaccharides in *Glycyrrhiza uralensis* fisch [J]. *Journal of Tarim University*, 2007(1):1-3. (in Chinese)
- [37] 候惠宁, 潘梦颖, 赵依一, 等. 甘草多糖对肉鸡肝脏抗氧化能力的影响[J]. 饲料工业, 2023, 44(10):39-44.
HOU H N, PAN M Y, ZHAO Y Y, et al. Effects of *Glycyrrhiza* Polysaccharide on antioxidant capacity of liver of broilers [J]. *Feed Industry*, 2023, 44(10):39-44. (in Chinese)
- [38] 王晴, 洪叶, 柳振宇, 等. 甘草多糖的抗氧化及降血糖作用研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1):398-404.
WANG Q, HONG Y, LIU Z Y, et al. Study on the antioxidant and hypoglycemic effects of glycyrrhiza polysaccharide [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1):398-404. (in Chinese)
- [39] SARAIVA M, VIEIRA P, O' GARRA A. Biology and therapeutic potential of interleukin-10 [J]. *J Exp Med*, 2019, 217(1):e20190418.
- [40] HIGASHIMURA Y, NAITO Y, TAKAGI T, et al. Oligosaccharides from agar inhibit murine intestinal inflammation through the induction of heme oxygenase-1 expression [J]. *Gastroenterol*, 2013, 48(8):897-909.
- [41] HIIPALA K, JOUHTEN H, RONKAINEN A, et al. The potential of gut commensals in reinforcing intestinal barrier function and alleviating inflammation [J]. *Nutrients*, 2018, 10(8):988.
- [42] KÜHN R, LÖHLER J, RENNICK D, et al. Interleukin-10-deficient mice develop chronic enterocolitis [J]. *Cell*, 1993, 75(2):263-274.
- [43] IYER S S, CHENG G. Role of Interleukin 10 transcriptional regulation in inflammation and autoimmune disease [J]. *Crit Rev Immunol*, 2012, 32(1):23-63.
- [44] JI X, HOU H, WANG X, et al. Effect of dietary *Glycyrrhiza* polysaccharides on growth performance, hepatic antioxidant capacity and anti-inflammatory capacity of broiler chickens [J]. *Res Vet Sci*, 2024, 167:105114.
- [45] 柴美灵, 武晓英, 张晓红, 等. 甘草多糖的免疫调节和抗炎作用机制研究进展[J]. 中国兽药杂志, 2021, 55(5):66-71.
CAI M L, WU X Y, ZHANG X H, et al. Advances in immunomodulation and anti-inflammatory mechanism of glycyrrhiza polysaccharide [J]. *Chinese Journal of Veterinary Drug*, 2021, 55(5):66-71. (in Chinese)
- [46] SALEEM F, AMETAJ B N, BOUATRA S, et al. A metabolomics approach to uncover the effects of grain diets on rumen health in dairy cows [J]. *J Dairy Sci*, 2012, 95(11):6606-6623.
- [47] 林秀蔚, 刘文, 丁得利, 等. 中草药添加剂在肉牛生产中的应用研究进展[J]. 现代畜牧科技, 2024(1):128-130.
LIU X W, LIU W, DING D L, et al. Research progress on the application of chinese herbal additives in beef cattle production [J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2024(1):128-130. (in Chinese)
- [48] 冯士彬, 程连平, 舒迎霜, 等. 黄芪多糖对湖羊羔羊生长性能、血清指标、消化功能和直肠菌群的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1):122-129.
FENG S B, CHENG L P, SHU Y S, et al. Effect of astragalus polysaccharide on growth performance, serum indices, digestive function and rectum flora of Hu lambs [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(1):122-129. (in Chinese)
- [49] 张凤荣, 于枫, 王赠超, 等. 复合植物多糖对肉兔生长性能、养分表观消化率和血清指标的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(5):48-52.
ZHANG F R, YU F, WANG Z C, et al. Effects of compound plant polysaccharides on growth performance, apparent digestibility of nutrients, and serum indexes in meat rabbits [J]. *Feed Research*, 2024, 47(5):48-52. (in Chinese)

- [50] 李张莲. 甘草药渣中多糖提取及生物活性的研究[D]. 石河子:石河子大学. 2022.
- LI Z L. Study on extraction and biological activity of polysaccharides from glycyrrhiza residue[D]. Shihezi: Shihezi University. 2022. (in Chinese)
- [51] 詹彦波, 张 丽, 瞿明仁, 等. 不同pH对瘤胃细菌数量和菌群结构的影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(1):184-195.
- ZAN Y B, ZHANG L, QU M R, et al. Effects of different pH on number and community structure of rumen bacteria [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(1):184-195. (in Chinese)
- [52] BRITTON R, KREHBIEL C. Nutrient metabolism by gut tissues[J]. *J Dairy Sci*, 1993, 76(7):2125-2131.
- [53] 庄一民, 刁其玉, 张乃锋. 幼龄反刍动物瘤胃上皮细胞 β -羟基丁酸代谢与调控机制[J]. 畜牧兽医学报, 2020, 51(4):660-669.
- ZHUANG Y M, DIAO Q Y, ZHANG N F. Metabolism and regulation mechanism of beta-hydroxybutyric acid in ruminal epithelium cells of young ruminants[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2020, 51(4):660-669. (in Chinese)
- [54] 徐丽云, 郑梦荷, 许子豪, 等. 黄芪多糖对泌乳初期奶牛血清生化指标、瘤胃发酵及表观消化率的影响[J]. 饲料工业, 2023, 44(1):80-86.
- XU L Y, ZHENG M H, XU Z H, et al. Effects of astragalus polysaccharide administration on serum biochemical indices, rumen fermentation and apparent digestibility of early lactating dairy cows [J]. *Feed Industry*, 2023, 44(1):80-86. (in Chinese)
- [55] 陈 亮, 唐祎凡, 陈鸿翼, 等. 反刍动物瘤胃甲烷减排的微生物调控路径[J]. 中国科学:生命科学, 2024: 1-15.
- CHEN L, TANG Y F, CHEN H Y, et al. Microbial regulatory pathways of methane emission reduction in the rumen of ruminants [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2024:1-15. (in Chinese)
- [56] 王 强, 万发春, 刘 磊, 等. 丁酸的生理功能及其在反刍动物中的应用研究进展[J]. 动物营养学报, 2023, 35(9):5513-5522.
- WANG Q, WAN F C, LIU L, et al. Research progress on physiological function of butyric acid and its application in ruminants [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35 (9) : 5513-5522. (in Chinese)
- [57] JANDHYALA S M, TALUKDAR R, SUBRAMANYAM C, et al. Role of the normal gut microbiota[J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2015, 21 (29) : 8787-8803.
- [58] 何金英, 徐勤辉, 王宇嘉, 等. 基于高通量测序技术分析中国荷斯坦奶牛瘤胃纤毛虫的物种多样性[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025:1-9.
- HE J Y, XU Q H, WANG Y J, et al. High-throughput sequencing deciphering diversity and individual variability of rumen ciliate protozoa in Chinese Holstein dairy cows [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2025: 1-9. (in Chinese)
- [59] 马 艳, 向 信, 樊嘉凯, 等. 海拔高度对青藏高原放牧牦牛肠道菌群多样性的影响[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2):620-634.
- MA Y, XIANG X, FAN J K, et al. Effect of altitude on the diversity of gut microbiota of yaks grazing on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(2):620-634. (in Chinese)
- [60] QIAO Y, LIU C, GUO Y, et al. Polysaccharides derived from astragalus membranaceus and glycyrrhiza uralensis improve growth performance of broilers by enhancing intestinal health and modulating gut microbiota[J]. *Poult Sci*, 2022, 101(7):101905.
- [61] CUI Y, LIU H, GAO Z, et al. Whole-plant corn silage improves rumen fermentation and growth performance of beef cattle by altering rumen microbiota[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2022, 106 (11) : 4187-4198.
- [62] 刘晓丹, 肖 瀛, 周建金, 等. 基于体外消化与发酵模型的多花黄精多糖对肠道菌群的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9):115-123.
- LIU X D, XIAO Y, ZHOU J J, et al. Effects of polygonatum cyrtoneura Hua. Polysaccharide on intestinal microorganisms based on in vitro-simulated digestion and fermentation model [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(9) : 115-123. (in Chinese)
- [63] 王耀晗, 黄楠楠, 李 彬, 等. 大气颗粒物暴露对肠道细菌丰度调节研究进展[J]. 环境与职业医学, 2024, 41(4):451-456.
- WANG Y H, HUANG N N, LI B, et al. Research progress on regulation of gut microbiota abundance induced by ambient particulate matter exposure [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2024, 41(4):451-456. (in Chinese)
- [64] KASAI C, SUGIMOTO K, MORITANI I, et al. Comparison of the gut microbiota composition

- between obese and non-obese individuals in a Japanese population, as analyzed by terminal restriction fragment length polymorphism and next-generation sequencing [J]. *BMC Gastroenterol*, 2015, 15:100.
- [65] MACDONALD J F H, PÉREZ-GARCÍA P, SCHNEIDER Y K H, et al. Community dynamics and metagenomic analyses reveal Bacteroidota's role in widespread enzymatic *Fucus vesiculosus* cell wall degradation[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):10237.
- [66] ZHANG Y, KANG C, WANG X L, et al. Dietary factors modulate colonic tumorigenesis through the interaction of gut microbiota and host chloride channels [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2018, 62(5).
- [67] CHEN X, SUN W, XU B, et al. Polysaccharides from the roots of *milletia speciosa* champ modulate gut health and ameliorate cyclophosphamide-induced intestinal injury and immunosuppression [J]. *Front Immunol*, 2021, 12:766296.
- [68] 王佳妮, 周殿友, 武丽娟. 肠道菌群在类风湿关节炎研究中的应用进展[J]. 河北医科大学学报, 2025, 46(2):235-240.
- WANG J N, ZHOU D Y, WU L J. Research progress on the application of intestinal flora in rheumatoid arthritis [J]. *Journal of Hebei Medical University*, 2025, 46(2):235-240. (in Chinese)
- [69] 张海龙. 花椒精油对小尾寒羊胃肠道功能及细菌菌群结构的调控[D]. 兰州: 甘肃农业大学. 2023.
- ZHANG H L. Modulation of gastrointestinal tract function and bacterial structure by *Zanthoxylum Bungeanum* essential oil on small-tailed Han Sheep [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University. 2023. (in Chinese)
- [70] BACKHED F, FRASER C M, RINGEL Y, et al. Defining a healthy human gut microbiome: current concepts, future directions, and clinical applications[J]. *Cell Host Microbe*, 2012, 12(5):611-622.
- [71] 段丽婷, 周连丽, 雷娟红, 等. 牛磺酸研究现状及抗脂质代谢紊乱研究进展[J]. 中国现代应用药学, 2024, 42(3):481-490.
- DUAN L T, ZHOU L L, LEI J H, et al. Research status of taurine and research progress of anti-lipid metabolism disorder [J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2024, 42(3):481-490. (in Chinese)
- [72] KIMURA I, ICHIMURA A, OHUE-KITANO R, et al. Free fatty acid receptors in health and disease[J]. *Physiol Rev*, 2020, 100(1):171-210.
- [73] HAYAMIZU K. 21-Amino Acids and Energy Metabolism: An Overview[M]//Sustained Energy for Enhanced Human Functions and Activity: Academic Press, 2017:339-349.
- [74] 张明发, 沈雅琴. 甘草及其有效成分抗脂肪肝和抗肥胖的研究进展[J]. 药物评价研究, 2015, 38(4):439-447.
- ZHANG M F, SHEN Y Q. Research advances on anti-obesity and anti-fatty liver effects of licorice and its active components [J]. *Drug Evaluation Research*, 2015, 38(4):439-447. (in Chinese)
- [75] 郝增华, 刘旭日, 张海静, 等. 硝基化合物作为反刍动物潜在产甲烷抑制剂的研究进展[J]. 中国饲料, 2020(4):23-26.
- HAO Z H, LIU X R, ZHANG H J, et al. Research progress on nitrocompounds as potential methanogenesis inhibitors in ruminants [J]. *China Feed*, 2020(4):23-26. (in Chinese)
- [76] 和东迁, 陶金忠. 反刍动物剩余采食量在瘤胃功能上的差异和相关分子生物学机制[J]. 动物营养学报, 2021, 33(6):3125-3131.
- HE D Q, TAO J Z. Difference of ruminant residual feed intake in rumen function and related molecular biological mechanism [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(6):3125-3131. (in Chinese)

(编辑 范子娟)