

DOI: 10.11686/cyxb2024289

http://cyxb.magtech.com.cn

徐倩, 郭帅, 张亮亮, 等. 补饲对放牧滩羊生长性能、血清生化及代谢组的影响. 草业学报, 2025, 34(6): 122-138.

XU Qian, GUO Shuai, ZHANG Liang-liang, *et al.* Effects of supplemental feeding on growth rate, and serum biochemical and metabolomic parameters of grazing Tan sheep. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 122-138.

补饲对放牧滩羊生长性能、血清生化及代谢组的影响

徐倩^{1,2,3}, 郭帅^{2,4}, 张亮亮⁵, 王占军⁶, 辛国省^{1,2,3*}

(1. 宁夏大学生命科学学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏饲料工程技术研究中心, 宁夏银川 750021; 3. 宁夏大学西部特色生物资源保护与利用教育部重点实验室, 宁夏银川 750021; 4. 宁夏大学动物科技学院, 宁夏银川 750021; 5. 宁夏昊标检测服务研究院, 宁夏银川 750021; 6. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 宁夏银川 750021)

摘要: 本试验旨在探究补饲水平对放牧滩羊生长性能、血液生化、抗氧化及血液代谢组的影响。选取体况一致、体重相近[(23.38±0.70) kg]的3月龄去势公滩羊24只, 随机分为4组。NC组(对照组)只放牧, LE(低能量组)、ME(中能量组)、HE(高能量组)组(试验组)先补饲精料再放牧, 各组补饲精料消化能水平分别为15.91(LE)、17.63(ME)和18.17(HE) MJ·kg⁻¹。预试期12 d, 正试期90 d。结果显示: 1) 与NC和LE组相比, HE、ME组滩羊的末重、平均日增重均显著增加($P < 0.05$)。2) ME组的经济效益高于其他组。3) 滩羊血液中空腹血糖、总胆固醇、甘油三酯、肌酐含量, 天门冬氨酸氨基转移酶活性和低密度脂蛋白胆固醇浓度随着饲粮能量水平的上升呈增加趋势, 其中HE组的甘油三酯含量显著高于其他组($P < 0.05$)。4) 能量水平可显著影响抗氧化能力, HE组丙二醛含量显著高于NC和LE组($P < 0.05$), ME组总抗氧化能力显著高于NC组($P < 0.05$), NC组谷胱甘肽过氧化物酶活性显著高于LE和ME组($P < 0.05$)。5) 血浆代谢组学分析共鉴定出17种代谢物差异显著, 富集的代谢通路主要有嘌呤代谢、核苷酸代谢、初级胆汁酸生物合成、花生四烯酸代谢、胆固醇代谢、酪氨酸代谢等。综上所述, 提高能量水平可有效提升放牧滩羊的生长性能, 这种改善可能是通过调节嘌呤代谢、花生四烯酸代谢等途径及其中间代谢产物来调控机体的抗氧化和免疫功能。在本试验条件下, 精料补饲水平为0.45 kg·d⁻¹时显示出较好的效果。

关键词: 能量; 人工草地; 宁夏滩羊; 放牧; 抗氧化; 血浆代谢

Effects of supplemental feeding on growth rate, and serum biochemical and metabolomic parameters of grazing Tan sheep

XU Qian^{1,2,3}, GUO Shuai^{2,4}, ZHANG Liang-liang⁵, WANG Zhan-jun⁶, XIN Guo-sheng^{1,2,3*}

1. School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Feed Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Key Lab of Ministry of Education for Protection and Utilization of Special Biological Resources in Western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. School of Animal Science and Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 5. Ningxia Haobiao Testing Service Research Institute, Yinchuan 750021, China; 6. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750021, China

Abstract: The aim of this experiment was to investigate the effects of supplemental feeding on growth rate, blood biochemistry, and antioxidant and blood metabolomic parameters of grazing Tan sheep. In the experiment, twenty-four 3-month-old castrated male Tan sheep, with similar body weight (23.38±0.70 kg), were randomly divided

收稿日期: 2024-07-23; 改回日期: 2024-09-09

基金项目: 宁夏回族自治区农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-15-05)和宁夏重点研发计划项目(2023BCF01037)资助。

作者简介: 徐倩(2001-), 女, 安徽阜阳人, 在读硕士。E-mail: 3282401415@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gsxin@nxu.edu.cn

into four groups: a 'no concentrate' group (NC, control) which were grazed only, and low energy (LE), medium energy (ME), and high energy (HE) groups which were the experimental groups and received supplemental concentrate feed before grazing. The digestible energy content of supplemented concentrate was 15.91, 17.63 and 18.17 MJ·kg⁻¹ for LE, ME and HE, respectively. There was a pre-trial adjustment period lasting 12 days and the experimental period lasted for 90 days. The results show: 1) Compared with NC and LE, the final weight and daily weight gain of the HE and ME groups was significantly increased ($P<0.05$). 2) The economic return of ME was higher than the economic returns from the other groups. 3) Fasting blood glucose, and levels of total cholesterol, triglycerides, creatinine, aspartate aminotransferase and low-density lipoprotein cholesterol concentrations in the blood of the sheep all tended to increase with increase in supplemental concentrate energy level, with triglyceride content in HE being notably higher than in the other groups ($P<0.05$). 4) The energy level markedly affected the animals' antioxidant capacity; the serum malondialdehyde content in HE was significantly higher than in NC and LE ($P<0.05$). In addition, the total antioxidant capacity in ME was notably higher than the NC ($P<0.05$). Moreover, glutathione peroxidase activity in NC was notably higher than in LE and ME ($P<0.05$). 5) The plasma metabolomics analysis identified a total of 17 metabolites with significant differences. The enriched metabolic pathways were mainly purine metabolism, nucleotide metabolism, primary bile acid biosynthesis, arachidonic acid metabolism, cholesterol metabolism, and tyrosine metabolism. In summary, increasing energy level effectively improved the growth rate of grazing Tan sheep. Blood biochemistry and metabolomic data indicate this improvement may be through the regulation of purine metabolism, arachidonic acid metabolism and other pathways and their intermediate metabolites to enhance body antioxidant and immune functions. Under the conditions of this experiment, the supplemental concentrate level of 0.45 kg·animal⁻¹·d⁻¹ (ME) showed the best effect.

Key words: energy; artificial grassland; Ningxia Tan sheep; grazing; antioxidant; plasma metabolome

宁夏盐池滩羊作为地区特色物种,以其高品质肉质和高营养价值在当地畜牧业中占据核心地位^[1],通过长期的自然选择,放牧滩羊展现出较好的环境适应能力,然而,禁牧政策的实施促使其养殖模式由放牧转变为舍饲^[2]。养殖模式的转变增加了滩羊养殖成本,禁牧还会导致天然草地生物多样性降低^[3],因此,在禁牧背景下开展人工草地放牧可作为一种选择。饲草是放牧家畜主要营养来源,与其营养需要相比,能量不足问题广泛存在于放牧系统中^[4],能量是影响放牧家畜营养的第一限制性因素,其不足会导致生长发育迟缓与免疫力下降等问题^[5]。研究表明,能量水平可显著影响动物的生长性能^[6]。相关研究报道,提高能量水平可提高动物的平均日增重及生产性能^[7-8]。此外,能量水平对动物的血液生化、抗氧化指标及血液代谢产物也有影响^[9-11]。卢连强等^[12]研究表明,随饲料能量水平的提高,安格斯公牛的血清总蛋白和白蛋白含量呈线性增加,表明机体的蛋白质合成作用增强。毕力格吐^[13]研究发现,提高能量水平能降低山羊血清中的丙氨酸氨基转移酶活性和丙二醛含量,提高总抗氧化能力。Xue等^[14]研究表明,适当增加饲料能量水平能提高绵羊的抗氧化能力,增强免疫力并改善生长性能,但是能量水平过高会导致肝损伤。Zhu等^[15]通过血浆代谢组学的研究表明,高能量饮食通过促进精氨酸、脯氨酸、嘌呤、味觉传导、嘧啶及谷胱甘肽代谢途径,对牦牛生长、抗氧化和免疫能力产生积极影响。放牧家畜补饲对提高其生产性能及健康水平具有重要意义,研究发现,放牧家畜干物质采食量与其体重及生产性能显著相关^[16]。Bargo等^[17]研究表明,一定条件下放牧家畜干物质采食量相对稳定,可通过补饲精料和降低牧草放牧采食提高能量摄入水平实现其生产性能提升。

在动物养殖生产研究中,关于能量水平对动物生理影响的研究已经取得了丰富的成果,这些研究为进一步探究动物的能量需求和代谢机制提供了坚实的基础^[18]。然而对于地方特色品种滩羊能量需求的研究仍然是不足的,特别是放牧条件下能量水平对滩羊健康状态的影响及其作用机制的研究甚少,这也阻碍了放牧滩羊能量补充及放牧管理技术的提升与应用。因此,本试验研究不同补饲能量水平对放牧滩羊生长性能、血液生化及代谢的影

响,探讨其生理代谢的调控机制。这将为研究放牧滩羊精准营养管理和放牧补饲技术提供理论依据,有利于人工草地资源高效利用及滩羊放牧养殖方式的创新发展。

1 材料与方 法

1.1 试验动物及设计

1.1.1 试验设计及饲养管理 选取24只健康无病、体重相近[(23.38±0.70) kg]的3月龄去势公滩羊。采用单因素完全随机试验设计,将试验滩羊随机分为4组,每组6只,每只为一个重复。本试验放牧滩羊的营养需要及补饲方法参考郭帅等^[19]的研究,根据滩羊体重、日增重核算采食量,按照试验设计先进行精料补饲,不足的饲草部分由放牧获得。

为探究不同能量水平对放牧滩羊的影响且满足生长需求(日增重200 g·d⁻¹),设计理论采食量为1.5 kg·d⁻¹,试验组根据《NY/T 816-2004 肉羊饲养标准》^[20]设计精料补充料。日粮处理包括不同水平的精料和精粗比,各组精料补充料与粗饲料的比值分别为15:85(低, low energy group, LE)、30:70(中, medium energy group, ME)、45:55(高, high energy group, HE);各组精料的消化能水平分别为15.91 MJ·kg⁻¹(LE)、17.63 MJ·kg⁻¹(ME)和18.17 MJ·kg⁻¹(HE)。在放牧的草地上,主要的牧草品种有扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)、新麦草(*Psathyrostachys juncea*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum* var. *mongolicum*)、苜蓿(*Medicago sativa*)和沙打旺(*Astragalus laxmannii*)等。为确保营养分析的准确性,在放牧的初期、中期和后期分别采集草样,饲草营养价值为放牧前期、中期和后期混合饲草营养价值的平均值,如表1所示。

本试验于2022年5月至2022年9月在宁夏盐池县四墩子人工混播放牧草地进行,试验羊舍选择在避风、向阳、干燥、通风良好的地方,试验开始前对羊舍进行消毒处理,并对所有羊只进行驱虫免疫和标号处理。NC组只进行放牧,放牧时间为全天放牧,LE、ME与HE组于每日的7:00、17:00分别补充饲喂精料饲粮一次,LE、ME、HE组每天的精料补饲量分别为0.225、0.450、0.675 kg·只⁻¹。采用全混合颗粒料饲喂,羊只自由采食和饮水。试验期102 d,其中预试期12 d,正试期90 d。

1.1.2 精料补充料组成及营养水平 本试验依据《NY/T 816-2004 肉羊饲养标准》^[20]设计基础饲粮,其精料补充料组成及营养水平(干物质基础)详见表2。

1.2 营养水平测定方法

粗蛋白含量采用凯氏定氮法^[21]测定,参照GB/T 6432-2018^[21];酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维均采用范氏的洗涤纤维分析法^[22-23]测定,分别参照NY/T 1459-2007和GB/T 20806-2006^[22-23];钙含量采用乙二胺四乙酸(EDTA)络合滴定法^[24]测定,参照GB/T 6436-2018^[24];总磷含量采用分光光度法^[25]测定,参照GB/T 6437-2018^[25]。

1.3 样品采集与制备

正试期的第90天晨饲前,从每组随机选取5只试验羊进行颈静脉采血5 mL于非抗凝采血管中,在室温状态下静置3 h,3500 r·min⁻¹离心10 min以收集血清,保存在液氮中,用于血清生化和抗氧化指标的测定。此外再进行颈静脉采血5 mL于抗凝管内,1600 r·min⁻¹离心15 min以收集血浆,装入冻存管中,-80 °C冷冻保存,用于血浆代谢组学的测定。

表1 牧草营养水平(干物质基础)

Table 1 Nutrient levels of grazed grass forage (dry matter basis)

项目 Item	值 Value
粗蛋白质 Crude protein (CP, %)	12.89
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %)	39.28
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %)	53.54
钙 Ca (%)	1.05
磷 P (%)	0.18
消化能 Digestible energy (DE, MJ·kg ⁻¹)	10.64

注: 饲草营养价值为放牧前期、中期和后期混合饲草营养价值的平均值。

Note: The nutritional value of forage was the average nutritional value of mixed forage at the early, middle and late grazing stages.

1.4 指标测定

1.4.1 生长性能的测定 在正试期的第一天和正试期结束最后1 d晨饲前分别对所有滩羊进行空腹称重,记为初始体重(initial weight, IW)和终末体重(final weight, FW)。

平均日增重(average daily gain, ADG)=(终末体重-初始体重)/试验天数

1.4.2 经济效益 根据2022年惠农网(www.cnhnb.com)的原料价格计算饲粮原料成本,根据人工草地饲草生产成本折算牧草干草价值约为0.94元·kg⁻¹[26]。精料补饲组LE、ME和HE各组平均每天采食精料分别为0.225、0.450和0.675 kg,根据滩羊生长需要设计理论采食量为1.5 kg·d⁻¹,因此各组饲草理论需要量分别为1.275、1.050、0.825 kg·d⁻¹。根据精料采食量计算饲料成本,根据粗饲料理论采食量计算牧草成本。

饲料成本=平均日采食精料量×饲料单价

牧草成本=牧草干物质采食量×牧草单价

增重收益=平均日增重×滩羊活重价格

经济收益=增重收益-饲料成本-牧草成本

1.4.3 血清生化指标的测定 使用购自南京建成生物工程研究所的试剂盒测定血清中总蛋白(total protein, TP)(货号:A045-2-2)、球蛋白(globulin, GLB)(货号:H547-1)、白蛋白(albumin, ALB)(货号:A045-1-1)、总胆固醇(total cholesterol, TC)(货号:A111-1-1)、甘油三酯(triglyceride, TG)(货号:A110-1-1)、空腹血糖(glucose, GLU)(货号:A154-2-1)、肌酐(creatinine, CREA)(货号:C011-2-1)含量,高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL)(货号:A112-2-1)、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL)浓度(货号:A113-2-1)及天门冬氨酸氨基转移酶(aspartate aminotransferase, AST)(货号:C010-1-1)、丙氨酸氨基转移酶(alanine aminotransferase, ALT)(货号:C009-1-1)、乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)活性(货号:A020-1-2)。具体试验操作步骤均参考试剂盒说明书。

1.4.4 血清抗氧化指标的测定 使用购自南京建成生物工程研究所的酶联免疫吸附测定(ELISA)试剂盒检测血清中过氧化氢酶(catalase, CAT)(货号:A007-1-1)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)(货号:A005-1-2)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性(货号:A001-3-2)与总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)(货号:A015-2-1)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量(货号:A015-2-1)。具体操作步骤参考试剂盒说明书。

1.4.5 血液代谢组指标的测定 制备完成的血浆样本委托武汉迈维生物科技有限公司进行分析。在备好的冰浴中将从-80℃冰箱取出的血浆样品移至离心管中,加入20%乙腈甲醇内标提取液,以12000 r·min⁻¹的离心力在4℃条件下离心10 min。离心完成后,将上清液移至新的离心管,并于-20℃条件下静置30 min;12000 r·min⁻¹、4℃下离心3 min后取上清液进行UPLC-MS/MS分析。

表2 精料补充料组成及营养水平(干物质基础)

Table 2 The composition and nutrient levels of concentrates diet (dry matter basis)

项目 Items	组别 Groups		
	LE	ME	HE
原料 Ingredients			
玉米 Corn (%)	79.27	71.53	72.62
酒糟 Distillers dried grains with solubles (DDGS, %)	0.67	11.73	12.02
磷酸氢钙 CaHPO ₄ (%)	6.00	3.00	2.00
大豆油 Soybean oil (%)	4.20	7.83	8.56
尿素 Urea (%)	0.00	0.97	1.51
小苏打 NaHCO ₃ (%)	1.33	0.67	0.45
食用盐 NaCl (%)	5.20	2.60	1.73
预混料 Premix ¹⁾ (%)	3.33	1.67	1.11
合计 Total (%)	100	100	100
营养水平 Nutrient level ²⁾			
粗蛋白质 Crude protein (CP, %)	7.11	12.43	14.22
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %)	2.69	3.41	3.47
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %)	1.19	2.46	2.51
钙 Ca (%)	2.08	1.09	0.76
磷 P (%)	1.70	1.03	0.78
消化能 Digestible energy (DE, MJ·kg ⁻¹)	15.91	17.63	18.17

¹⁾ 预混料为每 kg 饲粮提供 The premix provided the following per kg of diets: 维生素 A V_A 3750 IU, 维生素 D3 V_{D3} 1100 IU, 维生素 E V_E 10 IU, 铁 Fe 20 mg, 铜 Cu 5 mg, 锌 Zn 15 mg, 锰 Mn 15 mg, 碘 I 0.25 mg, 硒 Se 0.15 mg, 钴 Co 0.15 mg. ²⁾ 营养水平根据 NY/T 816-2004^[20] 计算得出。 Nutrient levels were all calculated value according to NY/T 816-2004^[20].

1.5 统计与分析

通过 Excel 2016 对原始数据进行初步整理,随后采用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并辅以 Duncan 氏法进行多重比对。结果呈现为均值和标准误(standard error, SEM),差异显著水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 补饲对放牧滩羊生长性能的影响

由表 3 可知,能量水平可显著影响滩羊的末重和平均日增重($P < 0.001$)。组间分析表明,ME 和 HE 组的末重和平均日增重均显著高于 NC 和 LE 组($P < 0.05$),但 ME、HE 组间差异不显著($P > 0.05$)。其中,HE 组的末重和平均日增重最高(分别为 42.00 kg 和 $177.70 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)。

表 3 补饲对放牧滩羊生长性能的影响

Table 3 Effects of supplemental feeding on growth performance of grazing Tan sheep

项目 Items	组别 Groups				标准误 Standard error (SEM)	P 值 P-value
	NC	LE	ME	HE		
初重 Initial weight (IW, kg)	23.60	23.60	23.65	24.04	0.18	0.792
末重 Final weight (FW, kg)	33.98b	34.15b	40.35a	42.00a	1.01	<0.001
平均日增重 Average daily gain (ADG, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)	102.70b	105.39b	163.73a	177.70a	9.31	<0.001

注:同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: In the same row, values with different lowercase letters mean significant difference ($P < 0.05$). The same below.

2.2 补饲对放牧滩羊经济效益的影响

由表 4 可知,在考虑放牧牧草成本和精饲料成本的条件下,ME 组饲养试验结束后每只滩羊的经济效益最高。

表 4 补饲对放牧滩羊经济效益的影响

Table 4 Effects of supplemental feeding on economic benefits of grazing Tan sheep

项目 Items	组别 Groups			
	NC	LE	ME	HE
牧草干物质采食量 Forage dry matter intake ($\text{kg} \cdot \text{piece}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	1.50	1.28	1.05	0.83
牧草干草价格 Forage hay price ($\text{CNY} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.94	0.94	0.94	0.94
牧草成本 Forage cost ($\text{CNY} \cdot \text{piece}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	1.41	1.20	0.99	0.78
补饲精料单价 Concentrate supplementation price ($\text{CNY} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	3.52	3.86	3.95
补饲量 Feeding levels of concentrate supplementation ($\text{kg} \cdot \text{piece}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	—	0.23	0.45	0.68
精料补饲成本 Concentrate supplementation cost ($\text{CNY} \cdot \text{piece}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	—	0.79	1.74	2.67
滩羊活重价格 Lamb sale price ($\text{CNY} \cdot \text{kg}^{-1}$)	36.00	36.00	36.00	36.00
平均日增重 Average daily gain ($\text{g} \cdot \text{piece}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	102.70	105.39	163.73	177.70
增重收益 Weight gain profits ($\text{CNY} \cdot \text{piece}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	3.70	3.79	5.89	6.40
经济效益 Economic benefits ($\text{CNY} \cdot \text{piece}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	2.29	1.80	3.17	2.96

注:根据滩羊体重核算干物质采食量为 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$,减去补饲精料的量即为牧草干物质采食量,因此各组饲草理论需要量分别为 1.275、1.050、 $0.825 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。根据 2022 年惠农网(www. cnhnb. com)的原料价格计算饲粮原料成本、牧草价格计算牧草成本。滩羊活重单价:36.00 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$ (参考试验期内当地当季活羊价格)。

Note: The dry matter intake was calculated as $1.5 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ based on the body weight of the Tan sheep, and the amount of supplemental concentrate was subtracted as the dry matter intake of forage, so the theoretical forage requirements for each group were 1.275, 1.050, and $0.825 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. Calculate the cost of feed grain raw materials and the cost of pasture based on the raw material prices in 2022 at Huinong (www. cnhnb. com). Unit price of Tan sheep live weight: 36.00 CNY $\cdot \text{kg}^{-1}$ (referred to the local seasonal live sheep price during the trial period).

2.3 补饲对放牧滩羊血清生化指标的影响

由表5可知,日粮能量水平的增加可显著影响血清中白蛋白、总胆固醇、甘油三酯、空腹血糖、肌酐、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇的含量和天门冬氨酸氨基转移酶、乳酸脱氢酶的活性($P<0.05$)。LE组的血清白蛋白含量显著低于ME和HE组($P<0.05$),ME和HE组血清总胆固醇、空腹血糖含量显著高于NC和LE组($P<0.05$),HE组的血清甘油三酯、肌酐含量和乳酸脱氢酶活性显著高于其他各组($P<0.05$)。HE组的血清天门冬氨酸氨基转移酶活性显著高于NC和LE组($P<0.05$)。ME组的高密度脂蛋白胆固醇含量显著高于NC和LE组($P<0.05$)。HE组的低密度脂蛋白胆固醇含量显著高于NC和LE组($P<0.05$)。其他指标在4组之间未表现出显著差异($P>0.05$)。

表5 补饲对放牧滩羊血清生化指标的影响

Table 5 Effects of supplemental feeding on serum biochemical indexes of grazing Tan sheep

项目 Items	组别 Groups				标准误 Standard error (SEM)	P值 P-value
	NC	LE	ME	HE		
总蛋白 Total protein (TP, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	74.20	71.50	74.94	72.93	0.92	0.602
白蛋白 Albumin (ALB, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	32.63ab	30.53b	33.75a	33.40a	0.46	0.029
球蛋白 Globulin (GLB, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	40.18	40.15	43.53	41.80	0.85	0.489
总胆固醇 Total cholesterol (TC, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.60b	1.90b	2.48a	2.66a	0.13	<0.001
甘油三酯 Triglyceride (TG, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.50b	0.55b	0.53b	0.69a	0.02	0.032
空腹血糖 Glucose (GLU, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.87b	3.26b	4.02a	4.12a	0.16	0.002
肌酐 Creatinine (CREA, $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	61.40c	67.00bc	73.25b	88.00a	2.56	<0.001
天门冬氨酸氨基转移酶 Aspartate aminotransferase (AST, $\text{U}\cdot\text{L}^{-1}$)	117.50b	119.75b	131.25ab	150.00a	4.71	0.036
丙氨酸氨基转移酶 Alanine aminotransferase (ALT, $\text{U}\cdot\text{L}^{-1}$)	21.75	18.75	18.75	18.25	0.69	0.278
乳酸脱氢酶 Lactate dehydrogenase (LDH, $\text{U}\cdot\text{L}^{-1}$)	460.25bc	403.67c	496.00b	567.67a	17.79	0.002
高密度脂蛋白胆固醇 High density lipoprotein cholesterol (HDL, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.75c	0.95bc	1.19a	1.07ab	0.05	0.005
低密度脂蛋白胆固醇 Low density lipoprotein cholesterol (LDL, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.33c	0.39bc	0.55ab	0.71a	0.05	0.002

2.4 补饲对放牧滩羊血清抗氧化指标的影响

由表6可知,能量水平的改变对滩羊血清中丙二醛含量、总抗氧化能力和超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶活性均有显著影响($P<0.05$)。随能量水平的增加,放牧滩羊血清丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性呈增加趋势。HE组的丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性显著高于NC和LE组($P<0.05$)。ME组总抗氧化能力显著高于NC组($P<0.05$)。NC组的谷胱甘肽过氧化物酶活性显著高于LE和ME组($P<0.05$)。

表6 补饲对放牧滩羊抗氧化指标的影响

Table 6 Effects of supplemental feeding on antioxidant indexes of grazing Tan sheep

项目 Items	组别 Groups				标准误 Standard error (SEM)	P值 P-value
	NC	LE	ME	HE		
丙二醛 Malondialdehyde (MDA, $\text{nmol}\cdot\text{mL}^{-1}$)	1.04b	0.77b	1.16ab	1.65a	0.11	0.036
过氧化氢酶 Catalase (CAT, $\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$)	3.14	3.51	3.58	3.96	0.15	0.231
超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase (SOD, $\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$)	50.40b	53.38b	56.83ab	60.46a	1.39	0.038
总抗氧化能力 Total antioxidant capacity (T-AOC, $\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$)	2.56b	2.90ab	4.26a	3.66ab	0.26	0.046
谷胱甘肽过氧化物酶 Glutathione peroxidase (GSH-Px, $\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$)	499.47a	176.42b	185.96b	371.92ab	43.82	0.011

2.5 补饲对放牧滩羊血浆代谢组的影响

2.5.1 代谢物鉴定 以迈维代谢自建数据库为参考,对所有样品进行代谢物的质控分析。运用广泛靶向代谢组学技术,在4个不同组别中检测出共计765个代谢物。如图1所示,这些代谢物被归类为17个主要类别,涵盖了碳水化合物及其代谢物、氨基酸及其代谢物、有机酸及其衍生物、脂肪酰类、甘油磷脂类、核苷酸及其代谢产物、酒精和胺等。

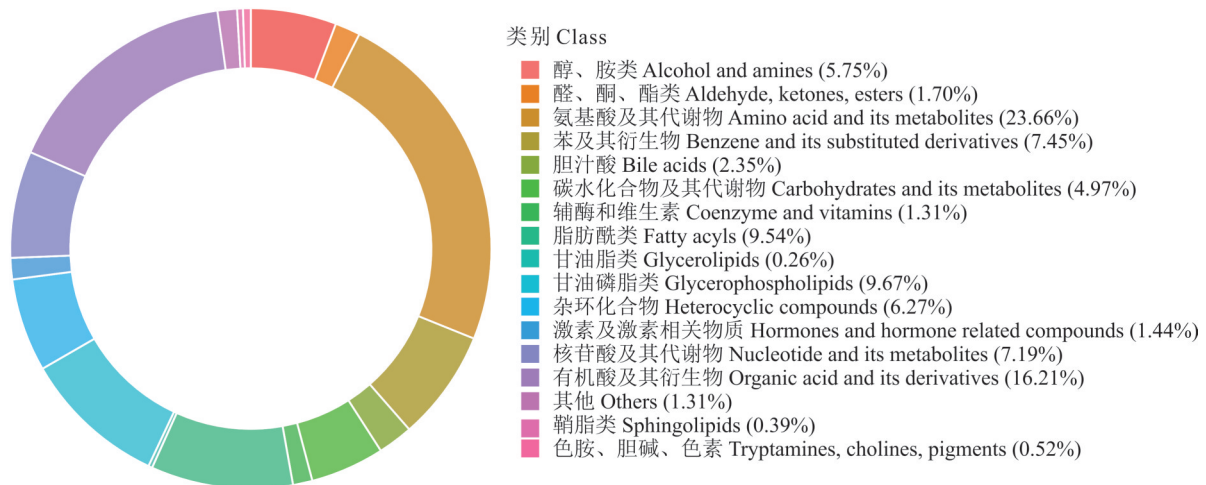


图1 代谢物类别组成环形图

Fig. 1 Circular diagram of metabolite class composition

2.5.2 血浆样本的主成分分析 对NC、LE、ME和HE组间分别进行无监督模式识别的多维数据统计分析,通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量,即主成分分析(principal component analysis, PCA)。结果如图2所示,从PCA图中可以看出各组之间区分明显,各组数据点基本聚集在一起,表明稳定性较好。

2.5.3 差异代谢物筛选、KEGG注释及通路分析 本研究基于KEGG数据库对识别出的差异代谢物进行了详尽的注释及通路富集分析。在筛选时,综合应用了变量重要性投影(variable importance in the project ≥ 1)与差异倍数(fold change ≥ 2 或 ≤ 0.5)的双重标准进行差异代谢物的筛选。KEGG功能注释发现差异代谢物主要富集在嘌呤代谢、核苷酸代谢、初级胆汁酸生物合成、胆汁分泌和花生四烯酸代谢、胆固醇代谢等通路。由表7和图3可知,LE和NC组相比,共筛选出5种代谢产物具有对应的KEGG注释,腺苷-3'-磷酸、5'-腺嘌呤核苷酸、2'-脱氧鸟苷5'-一磷酸(dGMP)、鸟苷5'-单磷酸上调,二十二碳六烯酸下调,涉及的代谢通路主要有ko04740(嗅觉转导)、ko04022(cGMP-PKG信号通路)、ko01523(抗叶酸耐药性)、ko00230(嘌呤代谢)、ko01040(不饱和脂肪酸的生物合成)。ME和NC组相比,共筛选出6种代谢产物具有对应的KEGG注释,5'-腺嘌呤核苷酸、2'-脱氧鸟苷、2'-脱氧鸟苷5'-一磷酸(dGMP)、鸟苷5'-单磷酸、肌苷5'-单磷酸上调,二十二碳六烯酸下调,涉及的代谢通路主要有ko01523(抗叶酸耐药性)、ko01232(核苷酸代谢)、ko00230(嘌呤代谢)、ko04740(嗅觉转导)、ko04022(cGMP-PKG信号通路)、ko04742(味觉转导)、ko01040(不饱和脂肪酸的生物合成)。HE和NC组相比,共筛选出3种差异代谢物具有对应的KEGG注释,3-羟基苯乙酸上调,2,5-二羟基苯甲酸、二十二碳六烯酸下调,涉及的代谢通路主要是ko00350(酪氨酸代谢通路)、ko01040(不饱和脂肪酸的生物合成)。

LE和ME组相比,共筛选出6种代谢产物具有对应的KEGG注释,鹅去氧胆酸、脱氧胆酸、2'-脱氧鸟苷、次黄嘌呤、肌苷、牛磺鹅去氧胆酸均下调,涉及的代谢通路主要有ko00120(初级胆汁酸生物合成)、ko04976(胆汁分泌)、ko01232(核苷酸代谢)、ko00230(嘌呤代谢)。LE和HE组相比,共筛选出7种代谢产物具有对应的KEGG注释,甘氨酸脱氧胆酸上调,2'-脱氧肌苷、2'-脱氧鸟苷、鸟苷、次黄嘌呤、肌苷、牛磺鹅去氧胆酸下调,涉及的代谢

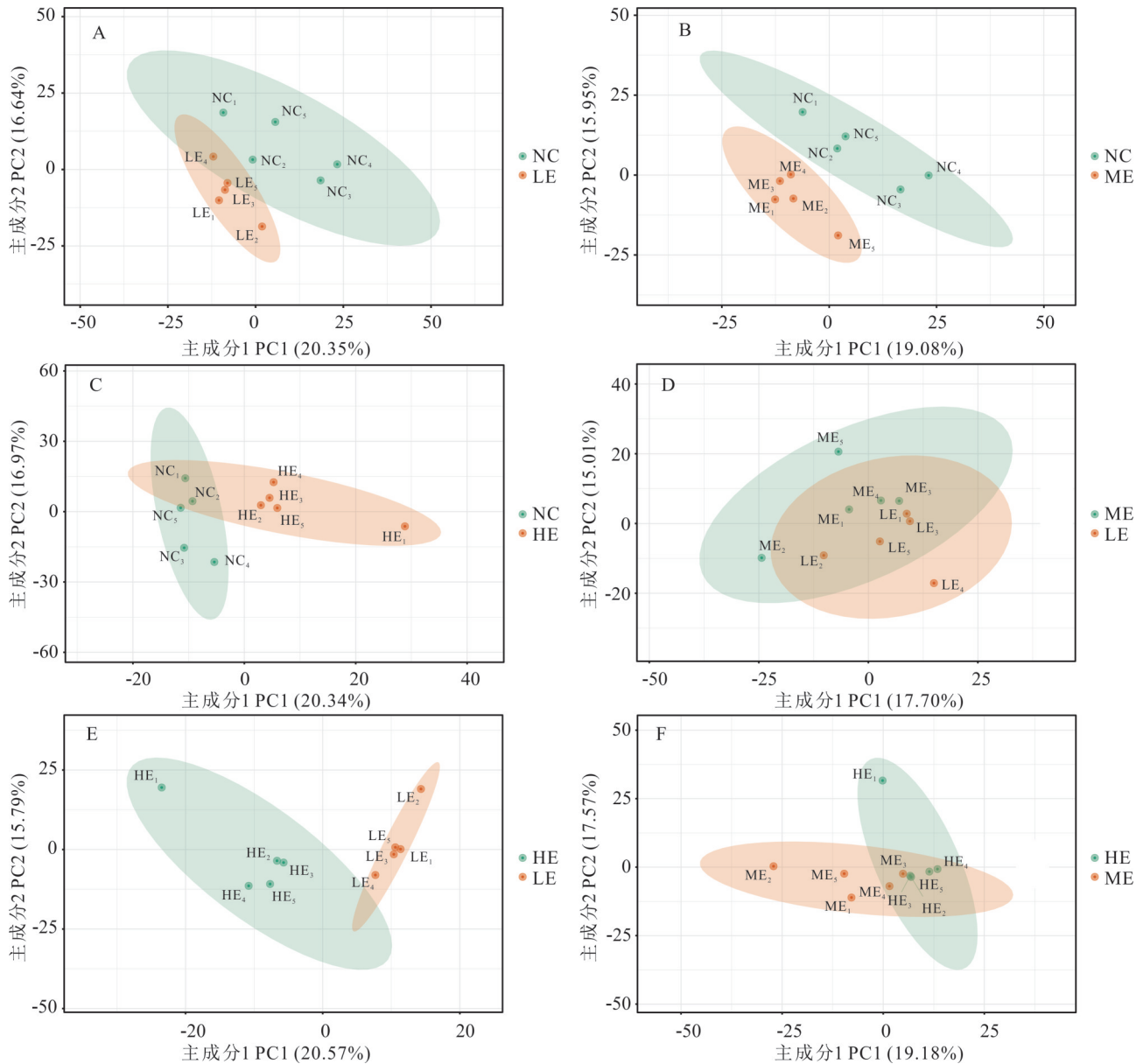


图 2 主成分分析结果

Fig. 2 Principal component analysis (PCA) result

通路主要有 ko01232(核苷酸代谢)、ko04979(胆固醇代谢)、ko00230(嘌呤代谢)、ko00120(初级胆汁酸生物合成)。ME 和 HE 组相比,共筛选出 3 种代谢产物具有对应的 KEGG 注释,11,12-双羟基-5Z,8Z,14Z-二十二碳三烯酸、8,9-双羟基-5Z,11Z,14Z-二十二碳三烯酸、15-脱氧- δ -12,14-前列腺素 J2 均上调,涉及的代谢通路主要有 ko00590(花生四烯酸代谢)。

2.6 血浆代谢组差异代谢物与血清生化及抗氧化指标的相关性

为进一步揭示能量水平调节放牧滩羊血浆代谢组与血清生化和抗氧化指标间的关系,进行 Spearman 相关性分析并生成热图(图 4)。提高能量水平与滩羊的血清丙二醛、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、总抗氧化能力、谷胱甘肽过氧化物酶、血清总蛋白、血清肌酐、白蛋白、血清球蛋白、血清总胆固醇、血清甘油三酯、空腹血糖、血清天门冬氨酸氨基转移酶、血清丙氨酸氨基转移酶、乳酸脱氢酶、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇和血浆差异代谢物具有一定的相关性。2'-脱氧鸟苷与血清丙二醛、甘油三酯、乳酸脱氢酶、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇呈显著正相关($P < 0.05$),与丙氨酸氨基转移酶呈显著负相关($P < 0.05$)。2,5-二羟基苯甲酸与丙二

表7 差异代谢物 KEGG 代谢通路富集分析

Table 7 Enrichment analysis of KEGG metabolic pathway of differential metabolites

组别 Group	代谢物 Metabolites	差异倍数 Fold change (FC)	变量重要性投影 Variable impor- tance project (VIP)	类型 Type	通路号 Pathway ID
NC组 vs LE组 NC group vs LE group	腺苷-3'-磷酸 Adenosine-3'-phosphate	4.13	1.09	上调 Up	ko00230,ko01100
	5'-腺嘌呤核苷酸 5'-adenosine monophosphate	4.00	1.74	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232,ko01240, ko01523,ko04022,ko04024,ko04068, ko04150,ko04151,ko04152,ko04211, ko04740,ko04742,ko04923,ko04924, ko04925,ko04927,ko04928,ko04934, ko05012,ko05022,ko05032
	2'-脱氧鸟苷 5'-磷酸 2'-deoxyguanosine 5'-monophosphate (dGMP)	2.28	1.69	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232
	鸟苷 5'-单磷酸 Guanosine-5'-monophosphate	3.35	1.45	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232,ko01523, ko04022,ko04740,ko04742,ko04744
	二十二碳六烯酸 Docosahexaenoic acid (DHA)	0.49	1.41	下调 Down	ko01040
NC组 vs ME组 NC group vs ME group	5'-腺嘌呤核苷酸 5'-adenosine monophosphate	8.19	1.58	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232,ko01240, ko01523,ko04022,ko04024,ko04068, ko04150,ko04151,ko04152,ko04211, ko04740,ko04742,ko04923,ko04924, ko04925,ko04927,ko04928,ko04934, ko05012,ko05022,ko05032
	2'-脱氧鸟苷 2'-deoxyguanosine	2.01	1.45	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	2'-脱氧鸟苷 5'-磷酸 2'-deoxyguanosine 5'-monophosphate (dGMP)	3.70	1.17	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	鸟苷 5'-单磷酸 Guanosine-5'-monophosphate	4.64	1.35	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232,ko01523, ko04022,ko04740,ko04742,ko04744
	肌苷 5'-单磷酸 Inosine 5'-monophosphate	3.62	1.39	上调 Up	ko00230,ko01100,ko01232,ko01240, ko01523,ko04742
	二十二碳六烯酸 Docosahexaenoic acid (DHA)	0.48	1.38	下调 Down	ko01040
NC组 vs HE组 NC group vs HE group	2,5-二羟基苯甲酸 2,5-dihydroxybenzoic acid	0.48	2.12	下调 Down	ko00350,ko01100
	3-羟基苯乙酸 3-hydroxyphenylacetic acid	2.39	1.83	上调 Up	ko00350,ko00360,ko01100
	二十二碳六烯酸 Docosahexaenoic acid (DHA)	0.38	1.74	下调 Down	ko01040
ME组 vs LE组 ME group vs LE group	鹅去氧胆酸 Chenodeoxycholic acid	0.20	1.56	下调 Down	ko00120,ko01100,ko04976
	脱氧胆酸 Deoxycholic acid	0.20	1.64	下调 Down	ko04976
	2'-脱氧鸟苷 2'-deoxyguanosine	0.48	1.60	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	次黄嘌呤 Hypoxanthine	0.50	1.70	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232
	肌苷 Inosine	0.46	1.89	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	牛磺鹅去氧胆酸 Taurochenodesoxycholic acid	0.33	2.01	下调 Down	ko00120,ko04976,ko04979
HE组 vs LE组 HE group vs LE group	2'-脱氧肌苷 2'-deoxyinosine	0.43	2.03	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	2'-脱氧鸟苷 2'-deoxyguanosine	0.45	1.47	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	甘氨酸脱氧胆酸 Glycochenodeoxycholic acid	3.44	1.58	上调 Up	ko00120,ko04976,ko04979
	鸟苷 Guanosine	0.34	1.17	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	次黄嘌呤 Hypoxanthine	0.48	1.27	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232
	肌苷 Inosine	0.39	1.29	下调 Down	ko00230,ko01100,ko01232,ko02010
	牛磺鹅去氧胆酸 Taurochenodesoxycholic acid	0.20	1.38	下调 Down	ko00120,ko04976,ko04979

续表 Continued Table

组别 Group	代谢物 Metabolites	差异倍数 Fold change (FC)	变量重要性投影 Variable impor- tance project (VIP)	类型 Type	通路号 Pathway ID
HE组 vs ME组	11,12-双羟基-5Z,8Z,14Z-二十二碳三烯酸 11,12-dihydroxy-5Z,8Z,14Z-docosatrienoic acid	3.18	1.07	上调 Up	ko00590,ko01100,ko04726
HE group vs ME group	8,9-双羟基-5Z,11Z,14Z-二十二碳三烯酸 8,9-dihydroxy-5Z,11Z,14Z-docosatrienoic acid	3.18	1.07	上调 Up	ko00590,ko01100,ko04726
	15-脱氧- δ -12,14-前列腺素 J2 15-deoxy- δ -12,14-prostaglandin J2	4.58	1.27	上调 Up	ko00590

醛、超氧化物歧化酶、总胆固醇、空腹血糖、血清肌酐、天门冬氨酸氨基转移酶、乳酸脱氢酶、低密度脂蛋白胆固醇呈显著负相关($P < 0.05$)。鹅去氧胆酸与过氧化氢酶呈显著负相关($P < 0.05$)。次黄嘌呤与过氧化氢酶、乳酸脱氢酶呈显著正相关($P < 0.05$)。肌苷与白蛋白、总胆固醇、甘油三酯、空腹血糖、乳酸脱氢酶、高密度脂蛋白胆固醇呈显著正相关($P < 0.05$)，与丙氨酸氨基转移酶呈显著负相关($P < 0.05$)。牛磺鹅去氧胆酸与丙二醛呈显著正相关($P < 0.05$)。甘氨酸脱氧胆酸与丙二醛、超氧化物歧化酶、天门冬氨酸氨基转移酶、乳酸脱氢酶呈显著负相关($P < 0.05$)。鸟苷与丙二醛、甘油三酯呈显著正相关($P < 0.05$)。丙氨酸氨基转移酶与 11,12-双羟基-5Z,8Z,14Z-二十二碳三烯酸和 8,9-双羟基-5Z,11Z,14Z-二十二碳三烯酸呈显著负相关($P < 0.05$)。二十二碳六烯酸与空腹血糖呈显著负相关($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 补饲对放牧滩羊生长性能的影响

生长性能是反映动物生长情况的重要指标,大量研究表明能量水平是影响动物生长性能的重要因素,增加能量水平可提高动物的生长性能^[27-28]。Song 等^[29]和 Williams 等^[30]研究发现,提高饲粮能量水平能使羔羊和奶牛的平均日增重和末重显著增加。Xue 等^[8]研究表明,对放牧牦牛补充能量能显著提高其平均日增重和末重。本研究发现,提高能量水平可提高放牧滩羊的末重和平均日增重,但中、高组之间差异不显著。王定发等^[31]对海南黑山羊饲喂试验发现,能量水平的提高对于末重和平均日增重有益,但是过高的能量水平则无显著影响,本试验结果与其一致。造成这种结果的原因可能是,适当提高饲粮能量水平对于生长性能的提升是有利的;然而达到动物所需的能量阈值时,会出现边际效应递减现象,生长性能不再呈现显著性提升^[32]。

3.2 补饲对放牧滩羊脂质代谢及能量代谢的影响

血清生化指标是评估牲畜生理代谢状况的重要指标,可反映动物的健康状况^[33]。大量研究表明,能量水平对动物机体的影响可通过血清生化指标的变化反映出来^[9-11,34]。

血清白蛋白由肝脏合成,在维持血浆胶体渗透压、调节免疫反应和营养平衡方面起着关键作用^[35]。Wang 等^[36]研究表明,增加饲粮能量水平羔羊血清白蛋白浓度呈增加趋势。张晨等^[37]研究发现,与低能量组相比,中、高饲粮能量水平能够显著提高德州驴血清中白蛋白的含量。本试验发现,ME 和 HE 组的白蛋白含量与 NC 组相比增加,与前人结果一致。代谢组学结果表明,高能量水平使参与嘌呤代谢的次黄嘌呤、肌苷、2'-脱氧肌酐、2'-脱氧鸟苷等中间代谢产物上调,说明嘌呤代谢旺盛。Yi 等^[5]研究发现提高牦牛饲粮的能量水平,能使嘌呤代谢相关的代谢物显著上调,表明高能量日粮有助于提高机体的嘌呤代谢。生化指标与血浆代谢组的相关性分析表明,白蛋白含量与肌苷呈显著正相关,而提高能量水平使肌苷显著上调,因此嘌呤代谢途径增强,有助于提高免疫能力。

血清总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇是体现脂质代谢的重要指标。乳酸脱氢酶主要在糖酵解过程中发挥作用,促进机体的能量代谢^[38]。甘油三酯是脂肪合成和能量储存的重要指标。相关研究报道,动物血清甘油三酯含量随饲粮能量水平升高而降低,原因可能是饲喂低能量饲粮使机体对血管中甘

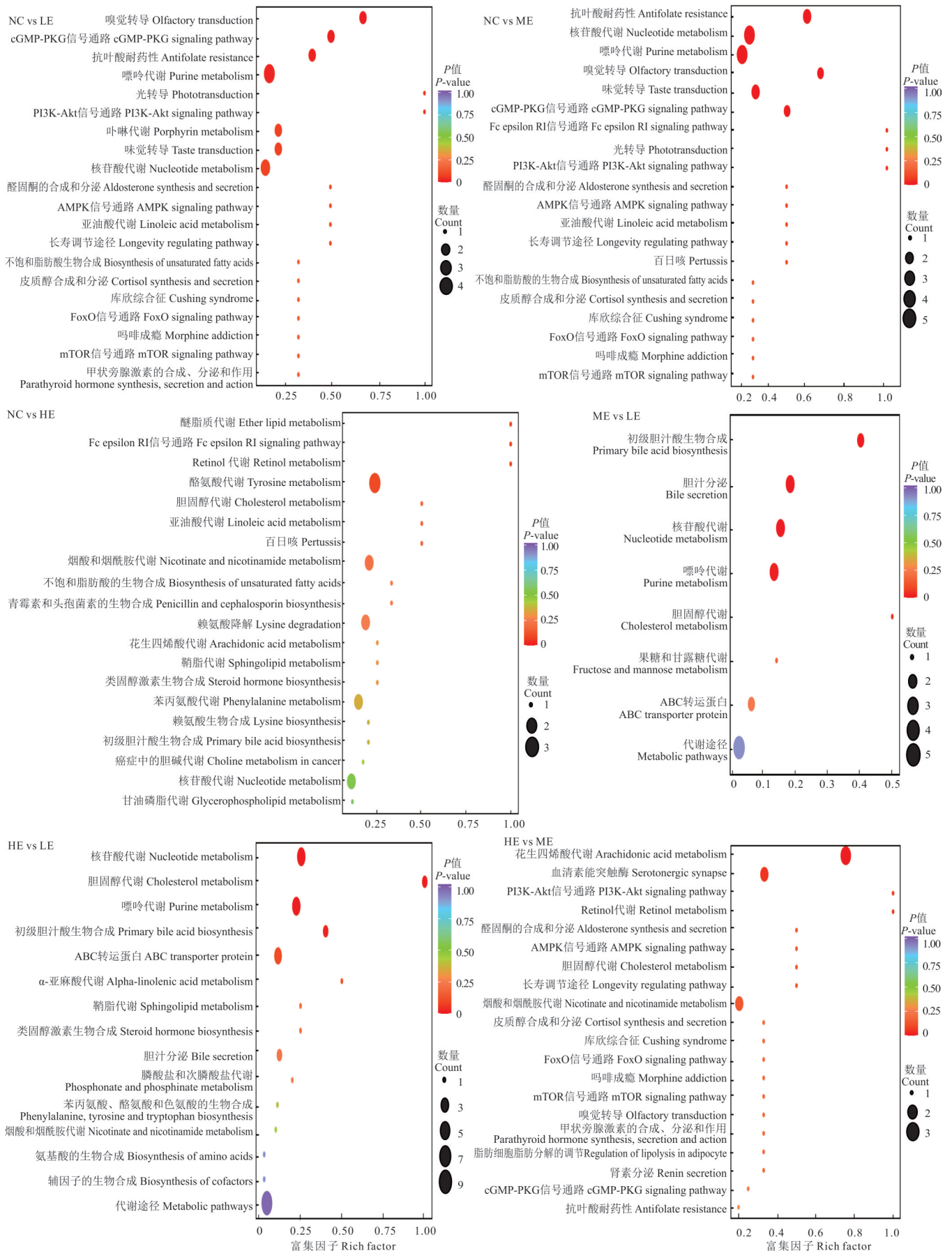


图3 差异代谢物 KEGG 代谢通路富集图

Fig. 3 Enrichment map of KEGG metabolic pathways of differential metabolites

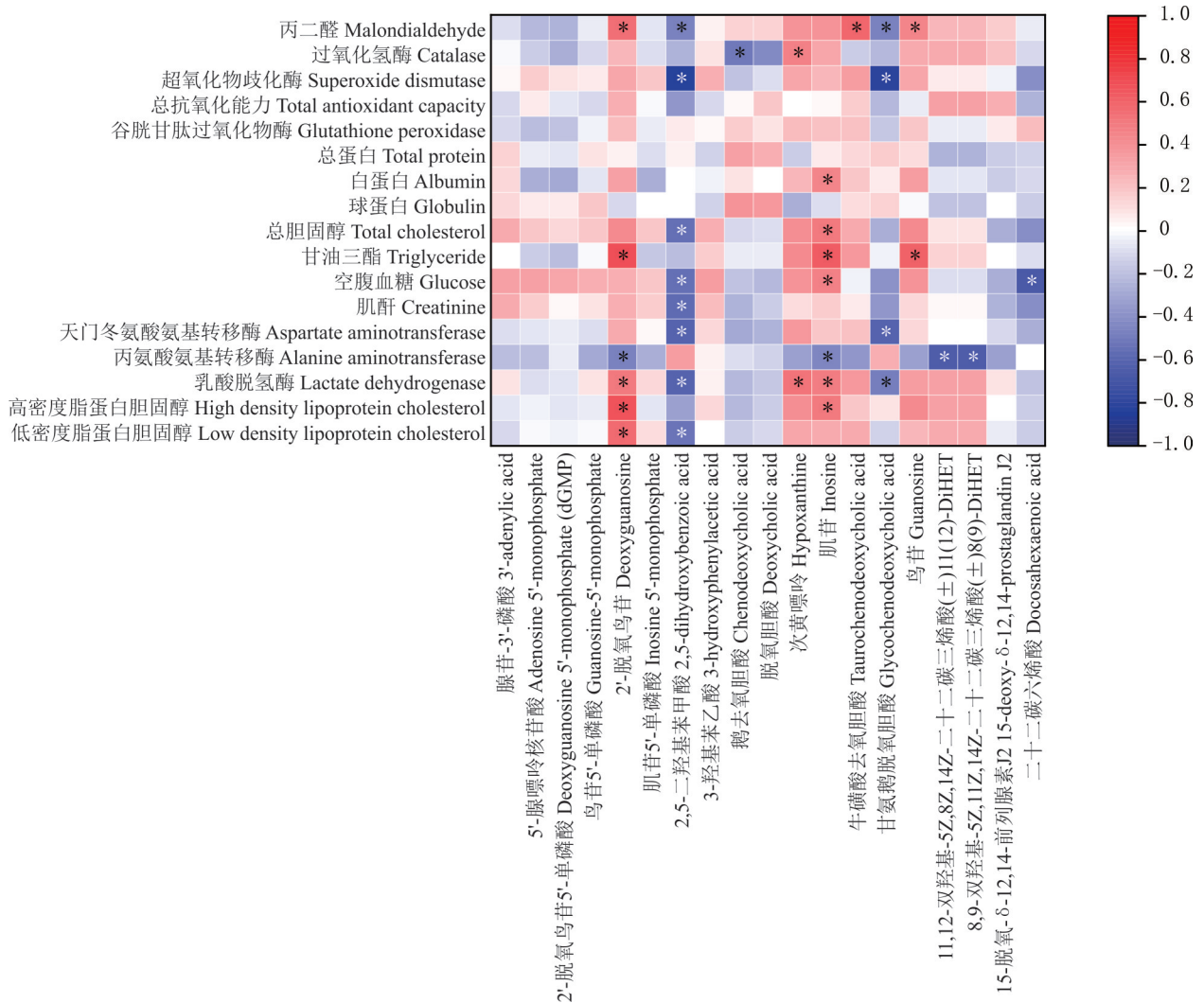


图 4 血清生化及抗氧化与血浆代谢组(差异代谢物)的相关性

Fig. 4 Correlations between serum biochemistry, antioxidants, plasma metabolome (differential metabolites)

“*”表示显著相关($P < 0.05$)。“*” means significant correlation ($P < 0.05$).

油三酯利用的能力减弱,所以血清甘油三酯含量较高^[12,39]。本试验发现,提高能量水平可提高放牧滩羊的血清总胆固醇、甘油三酯。吴华卓等^[40]研究表明,放牧牦牛补饲组血清中甘油三酯和总胆固醇的含量均高于对照组,本试验结果与其一致,这可能是因为高能量水平饲粮能够促进与脂肪合成相关酶的活性,促进肝细胞中的脂质合成,减少脂质氧化,从而使血清甘油三酯的含量升高^[14]。血清低密度脂蛋白胆固醇水平的增高可能表示炎症反应的发生^[41]。Zhang 等^[42]研究表明,随饲粮能量水平的提高,西门塔尔牛血清总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇水平升高,促进了脂质代谢。本研究结果表明,血清总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇含量、乳酸脱氢酶活性随饲粮能量水平的提高而增加,这与前人研究结果一致^[43-44],说明在放牧试验条件下,补饲高能量水平饲粮能促进机体的能量代谢和脂肪合成,但可能会引发炎症反应。

葡萄糖是能量的主要形式^[45],它可以被氧化并参与到脂肪酸合成的途径中^[46]。已有研究表明,饲粮能量水平通过影响代谢来影响血清葡萄糖浓度,能量不足会导致血糖下降^[47]。研究发现,血糖对于稳定细胞正常功能具有重要意义,血糖不足会影响动物机体的免疫功能^[48]。本试验中,ME 和 HE 组的葡萄糖含量显著高于 NC 和 LE 组,戴东文等^[49]对放牧牦牛补饲发现,血清葡萄糖含量随能量水平提高而显著升高,本试验结果与其一致。血清肌酐是肌酸的代谢产物,与肌肉中肌酸代谢有关^[50]。在本试验中,能量水平的提高会使血清肌酐含量增多,说明能量水平的提高可使放牧滩羊的肌肉代谢增强。天门冬氨酸氨基转移酶主要分布在肝脏中,当组织细胞发生炎

症或坏死时,天门冬氨酸氨基转移酶活性升高^[51]。一般认为羊的血清天门冬氨酸氨基转移酶活性正常范围为12~122 U·L⁻¹^[52],本试验中,HE组的天门冬氨酸氨基转移酶活性超过正常范围值,这可能是由于高能量水平饲料增加了动物肝脏的代谢负担,导致炎症和免疫调节的紊乱,使天门冬氨酸氨基转移酶的活性增加^[29]。本研究结果表明,适量补饲能量水平可促进放牧滩羊能量及脂质代谢,但能量过高反而会对机体产生一定的负面影响。

3.3 补饲对放牧滩羊抗氧化能力及免疫功能的影响

抗氧化能力是反映动物机体生理状态的重要指标之一。总抗氧化能力是反映机体防御系统抗氧化能力的重要指标^[53]。超氧化物歧化酶可以防止氧化应激,清除对细胞有剧毒的活性氧^[54]。谷胱甘肽过氧化物酶是一种重要的抗氧化酶,可通过酶促反应将过氧化物还原为羟基化合物以限制其有害作用^[55]。丙二醛是脂质过氧化物分解的产物,其含量可用来评估机体氧化损伤的程度^[56]。

Xue等^[14]研究表明,在一定范围内适当增加饲料能量水平能提高绵羊的抗氧化能力。毕力格吐^[13]研究发现,提高能量水平能增加总抗氧化能力,降低丙二醛含量。本试验结果显示,随着日粮能量水平的提高,滩羊血液中超氧化物歧化酶活性、丙二醛含量显著升高,谷胱甘肽过氧化物酶活性呈先下降后升高的趋势。嘌呤是一类对所有细胞都必不可少的有机小分子^[57],嘌呤降解产生尿酸,适量的尿酸可以清除氧自由基,起到抗氧化的作用^[58]。代谢组学结果显示嘌呤代谢途径随能量水平增加而增强,中间代谢产物与过氧化氢酶活性呈显著正相关($P < 0.05$),与NC组相比,这些代谢物在HE组中上调,因此提高饲料能量水平可能是通过调节尿酸的生成增强了机体的抗氧化能力。Zhu等^[15]通过血浆代谢组学研究表明,嘌呤代谢随膳食能量水平的提高而得到促进,对牦牛的抗氧化能力和免疫力产生积极影响。肝细胞以胆固醇为原料合成初级胆汁酸,胆汁酸在调节能量代谢、糖脂代谢中发挥重要作用,其变化可反映肝脏的氧化损伤^[59-60]。Zhang等^[61]研究表明,在饲料中适量添加胆汁酸能降低鲈鱼血浆中丙二醛含量,提高抗氧化能力。代谢组学结果表明,胆汁酸相关代谢物在ME和HE组显著上调,其中HE组的总抗氧化能力低于ME组,可能是因为HE组的能量水平过高而使机体处于氧化应激状态^[62]。

钟港等^[63]研究显示,黄牛血清丙二醛含量随饲料能量水平的提高而上升,谷胱甘肽过氧化物酶活性则显著降低。本试验代谢组学结果显示,与NC组相比,ME、HE组的胆汁酸代谢中间产物鹅去氧胆酸、脱氧胆酸浓度显著上调,相关性分析显示,丙二醛与2'-脱氧鸟苷、牛磺鹅去氧胆酸呈显著正相关($P < 0.05$),这可能是由于高能量日粮使得动物体内代谢活动增加而蓄积过多自由基,进而伴随着氧化应激的产生,引发炎症反应,导致丙二醛含量上升^[64]。丙二醛与2,5-二羟基苯甲酸呈显著负相关($P < 0.05$)。2,5-二羟基苯甲酸具有抗氧化性质,能够清除自由基保护细胞免受氧化应激损伤^[65]。

花生四烯酸作为 ω -6多不饱和脂肪酸的核心成分,经环氧合酶、脂氧合酶与细胞色素P450代谢,形成抗炎性类花生酸衍生物,如二十二碳三烯酸和前列腺素J2^[66]。研究表明,二十二碳三烯酸通过减少活性氧诱导的细胞死亡展现抗氧化能力^[67]。前列腺素J2通过抑制肿瘤坏死因子- α (TNF- α)触发的信号通路来激活过氧化物酶体增殖物激活受体 γ (PPAR γ),调节细胞粘附过程并抑制炎症,发挥其抗炎效应^[68]。Xu等^[69]研究发现,家鸽日粮中适量补充花生四烯酸,可有效提升其抗氧化能力。Wen等^[70]探究花生四烯酸添加至刺参(*Stichopus japonicus*)饲料中,发现低浓度时能增强机体的总抗氧化能力,高浓度则可能削弱其抗氧化性能。花生四烯酸代谢中间产物的调节作用被发现与提高动物的总抗氧化能力相关,改变能量水平会影响这一代谢过程,进而影响抗氧化能力。Zhang等^[71]提高藏羊饮食的能量水平时,发现与花生四烯酸代谢途径相关的中间代谢物上调。本试验中,ME与HE组相比,前列腺素J2和二十二碳三烯酸含量显著上调,且关联分析表明,花生四烯酸代谢中间产物含量与总抗氧化能力呈正相关,表明能量水平可能通过调节花生四烯酸代谢而调节机体的抗氧化能力,这与前人的研究结果一致。

前人研究发现,血清谷胱甘肽过氧化物酶活性随能量水平的提高而增加^[13-14]。本试验结果显示,提高能量水平谷胱甘肽过氧化物酶活性呈先降后升趋势,且NC组的谷胱甘肽过氧化物酶活性最高。这可能是由于NC组放牧滩羊只能摄入天然牧草,其包含多种天然的抗氧化剂如植物多酚,这些抗氧化剂能够帮助提高血清中谷胱甘肽过氧化物酶的活性^[72]。

4 结论

本试验表明,能量是影响放牧滩羊生长性能的重要限制性因素,适度增加补饲能量水平可显著提高放牧滩羊的日增重,并改善其抗氧化和免疫功能;血浆代谢组学分析表明,饲料能量水平可能通过调节花生四烯酸、嘌呤与核苷酸代谢途径以及中间代谢产物的水平来调控机体的免疫功能及抗氧化能力;在本放牧试验条件下,中等能量水平(17.63 MJ·kg⁻¹)精料补饲有利于放牧滩羊生产性能的提高和机体健康水平的提升。

参考文献 References:

- [1] Zhao Z W, Ma L N, Ma Q, *et al.* Fattening effect of different age of lemons and their addition levels on Salt Lake beach goats. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020(13): 121–123.
赵正伟, 马丽娜, 马青, 等. 不同树龄柠条及其添加水平对盐池滩羊的育肥效果. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(13): 121–123.
- [2] Huang H. Effects of feeding regimens on lipids metabolism and meat quality of Sunit sheep. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
黄欢. 不同饲养方式对苏尼特羊脂肪代谢及肉品质的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [3] Pulungan M A, Suzuki S, Gavina M K A, *et al.* Grazing enhances species diversity in grassland communities. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 11201.
- [4] Liu C, Li H, Huang J, *et al.* Study on the changes of forage nutrient and the digestive metabolism and energy requirements of lambs in native grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(11): 3415–3422.
刘程, 李慧, 黄晶, 等. 天然草地牧草营养变化及羔羊消化代谢、能量需求的研究. *草地学报*, 2023, 31(11): 3415–3422.
- [5] Yi S, Wu H, Liu Y, *et al.* Concentrate supplementation improves cold-season environmental fitness of grazing yaks: responsive changes in the rumen microbiota and metabolome. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1247251.
- [6] Hao C, Gao Q, Zhang J, *et al.* Effects of grape residue supplementation in diet on Liangfeng chicken growth performance, nutrient metabolism and blood biochemistry. *Journal of Applied Animal Research*, 2022, 50(1): 567–573.
- [7] Momen S M S, Hosseini M M S, Tahmasbi R, *et al.* Effect of energy and protein levels in supplemental diets on performance of Rayeni cashmere does and goat kids under natural grazing conditions. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 2021, 30(4): 303–311.
- [8] Xue B C, Zhang J X, Wang Z S, *et al.* Metabolism response of grazing yak to dietary concentrate supplementation in warm season. *Animal*, 2021, 15(3): 100175.
- [9] Cheng Z Z, Aibibula Y, Li F M, *et al.* Evaluation of feeding effect of pepper straw and its silage with different treatments on lambs. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(1): 387–396.
程志泽, 艾比布拉·伊马木, 李凤鸣, 等. 辣椒秸秆及其不同处理的青贮对羔羊饲喂效果评价. *动物营养学报*, 2024, 36(1): 387–396.
- [10] Baira E, Dagla I, Siapi E, *et al.* UHPLC-HRMS-based tissue untargeted metabolomics study of naringin and hesperidin after dietary supplementation in chickens. *Food Chemistry*, 2018, 269(32): 276–285.
- [11] Xin G S, Yang J, Li R G, *et al.* Dietary supplementation of hemp oil in teddy dogs: Effect on apparent nutrient digestibility, blood biochemistry and metabolomics. *Bioengineered*, 2022, 13(3): 6173–6187.
- [12] Lu L Q, Shi C X, Hao R K, *et al.* Effect of dietary energy levels on growth performance, nutrient apparent digestibility and serum biochemical indices of Angus bulls. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(7): 4464–4473.
卢连强, 史长笑, 郝日康, 等. 饲料能量水平对安格斯公牛生长性能、养分表观消化率和血清生化指标的影响. *动物营养学报*, 2022, 34(7): 4464–4473.
- [13] Biligetü. Effects of different feeding patterns on villus quality and blood biochemical parameters of Arbas cashmere goats. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
毕力格吐. 不同饲养模式对阿尔巴斯绒山羊绒毛品质及血液生化指标的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [14] Xue B, Hong Q, Li X, *et al.* Hepatic injury induced by dietary energy level via lipid accumulation and changed metabolites in growing semi-fine wool sheep. *Frontiers in Veterinary Science*, 2021, 8: 745078.
- [15] Zhu Y B, Sun G M, Dunzhu L S, *et al.* High energy level diet improves the growth performance and rumen fermentation of yaks in cold weather. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, 10: 1212422.
- [16] Blake N E, Walker M, Plum S, *et al.* Predicting dry matter intake in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 2023, 101: 269.
- [17] Bargo F, Muller L D, Delahoy J E, *et al.* Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(7): 1777–1792.

- [18] He Z F, Xie J P, Chen P, *et al.* Effects of different protein and energy levels of diets on growth performance, nutrient apparent digestibility and serum biochemical indexes of fattening yaks in shelter feeding. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(3): 1698–1712.
何振富, 谢建鹏, 陈平, 等. 不同蛋白质、能量水平饲料对舍饲育肥牦牛生长性能、养分表观消化率及血清生化指标的影响. *动物营养学报*, 2024, 36(3): 1698–1712.
- [19] Guo S, Yang H C, Li R G, *et al.* Effects of grazing and housing feeding patterns on meat quality, rumen environment and microbiota structure of Tan sheep. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(8): 1798–1807.
郭帅, 杨慧超, 李瑞国, 等. 放牧与舍饲模式对滩羊肉品质、瘤胃环境及菌群结构的影响. *西南农业学报*, 2023, 36(8): 1798–1807.
- [20] Wang J Q, Lu D X, Yang H J, *et al.* Feeding standard of meat-producing sheep and goats: NY/T 816-2004. Beijing: China Agricultural Press, 2004.
王加启, 卢德勋, 杨红建, 等. 肉羊饲养标准: NY/T 816-2004. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [21] Xiao Z M, Fan X, Ma D X, *et al.* GB/T 6432-2018. Determination of crude protein in feeds-Kjeldahl method. Beijing: Standards Press of China, 2018.
肖志明, 樊霞, 马东霞, 等. 饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法: GB/T 6432-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [22] Li H L, Zhao C H, Jia Q, *et al.* Determination of acid detergent fiber in feedstuff (ADF): NY/T 1459-2007. Beijing: China Agricultural Press, 2007.
李会玲, 赵彩会, 贾青, 等. 饲料中酸性洗涤纤维的测定: NY/T 1459-2007. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [23] Wang J Q, Yu J G, Wu K Q, *et al.* Determination of neutral detergent fiber in feedstuffs: GB/T 20806-2006. Beijing: Standards Press of China, 2006.
王加启, 于建国, 吴克谦, 等. 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定: GB/T 20806-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [24] Gao L H, Wang S S, Huang T, *et al.* Determination of calcium in feeds: GB/T 6436-2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
高丽红, 王思思, 黄婷, 等. 饲料中钙的测定: GB/T 6436-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [25] Shang J, Hua X H, Huang S X, *et al.* Determination of phosphorus in feeds—Spectrophotometry: GB/T 6437-2018. Beijing: Standards Press of China, 2006.
商军, 华贤辉, 黄土新, 等. 饲料中总磷的测定—分光光度法: GB/T 6437-2018. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] Yang H C. Effects of different breeding models on growth performance, meat quality, and related metabolism of Ningxia Tan sheep. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
杨慧超. 饲养方式对宁夏滩羊生长性能、肉品质以及相关代谢的影响. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [27] Liu H, Ran T, Zhang C, *et al.* Comparison of rumen bacterial communities between yaks (*Bos grunniens*) and Qaidam cattle (*Bos taurus*) fed a low protein diet with different energy levels. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 982338.
- [28] Wanjala G, Kichamu N, Strausz P, *et al.* On-station comparative analysis of reproductive and survival performance between Red Maasai, Dorper, and Merino sheep breeds. *Animal*, 2023, 17(3): 100715.
- [29] Song S, Wu J, Zhao S, *et al.* The effect of periodic energy restriction on growth performance, serum biochemical indices, and meat quality in sheep. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(10): 4251–4263.
- [30] Williams K T, Weigel K A, Coblenz W K, *et al.* Effect of diet energy level and genomic residual feed intake on bred Holstein dairy heifer growth and feed efficiency. *Journal of Animal Science*, 2022, 105(3): 2201–2214.
- [31] Wang D F, Zhou L L, Li M, *et al.* Effects of different nutritional levels of diet on the growth performance and organ indexes in fattening Hainan black goats. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2013, 40(2): 62–66.
王定发, 周璐丽, 李茂, 等. 不同营养水平日粮对海南黑山羊肥育羔羊生长性能和器官指数的影响. *中国畜牧兽医*, 2013, 40(2): 62–66.
- [32] Guo Y M. Effects of dietary energy levels on rumen nitrogen transportation and utilization in Tibetan sheep. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
郭亚敏. 饲料能量水平对藏羊瘤胃氮素转运及利用效率的影响. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [33] Dong J Q, Zhang H, Jiang X F, *et al.* Comparison of serum biochemical parameters between two broiler chicken lines divergently selected for abdominal fat content. *Journal of Animal Science*, 2015, 93(7): 3278–3286.
- [34] Jo Y H, Kim W S, Peng D Q, *et al.* Effects of different energy levels and two levels of temperature-humidity indices on growth, blood metabolites, and stress biomarkers in Korean native calves. *Journal of Thermal Biology*, 2023, 117: 103703.

- [35] Xu X, Hu J, Xue H, *et al.* Applications of human and bovine serum albumins in biomedical engineering: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(30): 126914.
- [36] Wang Q, Wang Y, Hussain T, *et al.* Effects of dietary energy level on growth performance, blood parameters and meat quality in fattening male Hu lambs. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2020, 104(2): 418–430.
- [37] Zhang C, Yang Q, Wang Y P, *et al.* Effects of dietary energy level on growth performance, nutrient digestibility and serum biochemical indices of Dezhou donkeys. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(2): 1158–1164.
张晨, 杨泉, 王云鹏, 等. 饲粮能量水平对德州驴生长性能、营养物质消化率及血清生化指标的影响. *动物营养学报*, 2022, 34(2): 1158–1164.
- [38] Pal K, Patra A K, Sahoo A, *et al.* Effects of nitrate and fumarate in tree leaves-based diets on nutrient utilization, rumen fermentation, microbial protein supply and blood profiles in sheep. *Livestock Science*, 2015, 172(2): 5–15.
- [39] Huang W Q, Qi M L, Lv X K, *et al.* Effects of dietary energy and protein levels on the growth, digestion performance and serum indexes of 21–60 days old Hu sheep lambs. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2019, 50(1): 105–114.
黄文琴, 祁敏丽, 吕小康, 等. 饲粮能量和蛋白质水平对21~60日龄湖羊生长、消化性能及血清指标的影响. *畜牧兽医学报*, 2019, 50(1): 105–114.
- [40] Wu H Z, Peng Z L, Gao Y H, *et al.* Effect of supplementary concentrate on growth performance, apparent nutrient digestibility and serum biochemical indices of grazing yaks in cold season. *China Feed*, 2020(7): 55–60.
吴华卓, 彭忠利, 高彦华, 等. 冷季补饲精料对放牧牦牛生长性能、养分消化率和血清生化指标的影响. *中国饲料*, 2020(7): 55–60.
- [41] Herbert K E, Erridge C. Regulation of low-density lipoprotein cholesterol by intestinal inflammation and the acute phase response. *Cardiovascular Research*, 2018, 114(2): 226–232.
- [42] Zhang H, Zhang X, Wang Z S, *et al.* Effects of dietary energy level on lipid metabolism-related gene expression in subcutaneous adipose tissue of Yellow breed×Simmental cattle. *Animal Science Journal*, 2015, 86(4): 392–400.
- [43] Ren J G, Guan P, Huang J Z, *et al.* Effects of dietary energy level on growth-fattening performance and serum biochemical indices of Angus bulls. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2023, 50(3): 966–976.
任建刚, 关鹏, 黄建智, 等. 饲粮能量水平对安格斯公牛育肥性能及血清生化指标的影响. *中国畜牧兽医*, 2023, 50(3): 966–976.
- [44] Lasa A, Simón E, Churrua I, *et al.* Adiposity and serum parameters in hamsters fed energy restricted diets supplemented or not with *trans*-10, *cis*-12 conjugated linoleic acid. *Journal of Physiology and Biochemistry*, 2007, 63(4): 297–304.
- [45] Chelikani P K, Ambrose D J, Keisler D H, *et al.* Effects of dietary energy and protein density on plasma concentrations of leptin and metabolic hormones in dairy heifers. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(4): 1430–1441.
- [46] Uyeda K, Repa J J. Carbohydrate response element binding protein, ChREBP, a transcription factor coupling hepatic glucose utilization and lipid synthesis. *Cell Metabolism*, 2006, 4(2): 107–110.
- [47] Wang Y, Wang Q, Dai C, *et al.* Effects of dietary energy on growth performance, carcass characteristics, serum biochemical index, and meat quality of female Hu lambs. *Animal Nutrition*, 2020, 6(4): 499–506.
- [48] Shi H B, Wang Y Q, He W T, *et al.* The determination of growth performance, wool quality and blood physiological and biochemical indexes of SDH hybrid sheep. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2019, 46(2): 404–413.
施会彬, 王玉琴, 何翁潭, 等. 萨杜湖杂交羊生长性能、羊毛品质及血液生理生化指标测定. *中国畜牧兽医*, 2019, 46(2): 404–413.
- [49] Dai D W, Wang S X, Wang X, *et al.* Effects of different concentrate supplementation levels on growth performance, blood markers, and economic return of yaks grazing in the warm season. *Pratacultural Science*, 2020, 37(11): 2359–2365.
戴东文, 王书祥, 王迅, 等. 精料补饲水平对暖季放牧牦牛生长性能、血清生化指标及养殖收益的影响. *草业科学*, 2020, 37(11): 2359–2365.
- [50] Molina E, Gonzalez-Redondo P, Moreno-Rojas R, *et al.* Evaluation of haematological, serum biochemical and histopathological parameters of growing rabbits fed *Amaranthus dubius*. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2018, 102(2): e525–e533.
- [51] Hosseinian S A, Hasanzadeh F. Impact of high dietary energy on obesity and oxidative stress in domestic pigeons. *Veterinary Medicine and Science*, 2021, 7(4): 1391–1399.
- [52] Zou M, Lin H Q, Deng H C, *et al.* Determination and analysis of blood physiological and biochemical indexes and immunoglobulin G in Guizhou white goats. *Veterinary Orientation*, 2021(11): 121–123.

- 邹明, 林汉卿, 邓华成, 等. 贵州白山羊血液生理生化指标及免疫球蛋白G测定与分析. 兽医导刊, 2021(11): 121—123.
- [53] Barszcz M, Taciak M, Tusino A, *et al.* The effect of organic and inorganic zinc source, used in combination with potato fiber, on growth, nutrient digestibility and biochemical blood profile in growing pigs. *Livestock Science*, 2019, 227(9): 37—43.
- [54] Wang Y T, Wang Q F, Wang Y F, *et al.* Statistical optimization for the production of recombinant cold-adapted superoxide dismutase in *E. coli* using response surface methodology. *Bioengineered*, 2017, 8(6): 693—699.
- [55] Lubos E, Loscalzo J, Handy D E. Glutathione peroxidase-1 in health and disease: from molecular mechanisms to therapeutic opportunities. *Antioxidants and Redox Signaling*, 2011, 15(7): 1957—1997.
- [56] Tsikas D. Assessment of lipid peroxidation by measuring malondialdehyde (MDA) and relatives in biological samples: Analytical and biological challenges. *Analytical Biochemistry*, 2017, 524(9): 13—30.
- [57] Zhang Z Q, Zhou C, Fan K P, *et al.* Metabolomics analysis of the effects of temperature on the growth and development of juvenile European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *The Science of the Total Environment*, 2021, 769(20): 145155.
- [58] Ndrepepa G. Uric acid and cardiovascular disease. *Clinica Chimica Acta*, 2018, 484(9): 150—163.
- [59] Luo X, Nie Q X, Jiang C T. The role of gut microbiota and bile acids in metabolic diseases. *Progress in Physiological Sciences*, 2022, 53(6): 409—415.
- 罗茜, 聂启兴, 姜长涛. 肠道菌群及胆汁酸在代谢性疾病的作用. *生理科学进展*, 2022, 53(6): 409—415.
- [60] Zhang J J, Chen X S, Qu L T, *et al.* Effect of bile acids in high-lipid diet on growth performance and muscle fatty acid composition of gibel carp (*Carassius auratus gibelio*). *Feed Research*, 2023, 46(14): 41—45.
- 张晶晶, 陈祥顺, 曲乐天, 等. 高脂饲料中添加胆汁酸对异育银鲫生长及肌肉脂肪酸组成的影响. *饲料研究*, 2023, 46(14): 41—45.
- [61] Zhang Y, Feng H, Liang X F, *et al.* Dietary bile acids reduce liver lipid deposition via activating farnesoid X receptor, and improve gut health by regulating gut microbiota in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*). *Fish and Shellfish Immunology*, 2022, 121(2): 265—275.
- [62] Agenas S, Heath M F, Nixon R M, *et al.* Indicators of undernutrition in cattle. *Animal Welfare*, 2006, 15(2): 149—160.
- [63] Zhong G, Chen K, Lin W C, *et al.* Effects of different dietary energy levels on growth performance, blood biochemical indexes and antioxidant power of Xiangnan yellow cattle. *Chinese Journal of Animal Science*, 2021, 57(8): 219—223.
- 钟港, 陈坤, 林文超, 等. 不同日粮能量水平对湘南黄牛生长性能、血液生化指标及抗氧化力的影响. *中国畜牧杂志*, 2021, 57(8): 219—223.
- [64] Dandona P, Aljada A, Bandyopadhyay A. Inflammation: the link between insulin resistance, obesity and diabetes. *Trends in Immunology*, 2004, 25(1): 4—7.
- [65] Atko D, Vaková J, Perjési P, *et al.* Pro-oxidative and antioxidant effects of salicylates. *Chemical Papers*, 2020, 74(9): 3161—3168.
- [66] Li X P, Tan Z L, Li Z C, *et al.* Metabolomic changes in the liver tissues of cows in early lactation supplemented with dietary rumen-protected glucose during the transition period. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 281(11): 115093.
- [67] Meesapyodsuk D, Sun K W, Zhou R, *et al.* Stepwise metabolic engineering of docosatrienoic acid-an ω -3 very long-chain polyunsaturated fatty acid with potential health benefits in *Brassica carinata*. *Plant Biotechnology Journal*, 2023, 21(1): 8.
- [68] Wang T, Fu X, Chen Q, *et al.* Arachidonic acid metabolism and kidney inflammation. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(15): 3683.
- [69] Xu Q, Wang X, Liu Y, *et al.* Parental dietary arachidonic acid altered serum fatty acid profile, hepatic antioxidant capacity, and lipid metabolism in domestic pigeons (*Columba livia*). *Animal Science Journal*, 2021, 92(1): e13616.
- [70] Wen B, Gao Q, Dong S, *et al.* Effects of different feed ingredients on growth, fatty acid profiles, lipid peroxidation and aminotransferases activities of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquaculture*, 2016, 454(5): 176—183.
- [71] Zhang X, Han L J, Hou S Z, *et al.* Metabolomics approach reveals high energy diet improves the quality and enhances the flavor of black Tibetan sheep meat by altering the composition of rumen microbiota. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 915558.
- [72] Liao X, Zheng S J, Lu K K, *et al.* Plant polyphenols exert antioxidant activity of by Nrf2/ARE signaling pathway: a review. *Food Science*, 2016, 37(7): 227—232.
- 廖霞, 郑少杰, 卢可可, 等. 植物多酚通过 Nrf2/ARE 信号通路抗氧化作用研究进展. *食品科学*, 2016, 37(7): 227—232.