

精氨酸对绵羊胴体品质、肉质特性及瘤胃细菌组成的影响

康乐天^{1,2}, 王威皓^{1,2}, 刘婷^{1,2}, 张台武^{1,2}, 赵欣^{1,2}, 翟茂琴^{1,2},
李军³, 靳焱^{1,2}, 段艳^{1,2*}

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 农业农村部生鲜牛羊肉加工技术集成科研基地, 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古苏尼特右旗荣宇现代生态畜牧业有限公司, 苏尼特右旗 011200)

摘要: 瘤胃细菌在绵羊骨骼肌脂肪酸沉积中起着重要作用。为研究精氨酸对绵羊胴体品质、肉质特性和瘤胃细菌组成的影响, 探究瘤胃细菌变化与脂肪酸沉积之间的关系, 利用宏基因组测序、气相色谱技术分析绵羊补饲精氨酸后瘤胃细菌组成和肌肉脂肪酸谱的变化, 建立两者间的关联性。选取 16 只健康且体质量相近的 3 月龄绵羊, 随机分为对照组 (基础饲粮) 和精氨酸组 (基础饲粮+1% 精氨酸), 进行 90 d 的饲养试验。结果表明, 与对照组相比, 精氨酸组绵羊的背膘厚显著降低 ($P<0.05$), 背最长肌的亮度 (L^*) 值、黄度 (b^*) 值及剪切力值均显著减小 ($P<0.05$), 红度 (a^*) 值显著增加 ($P<0.05$)。精氨酸组背最长肌十五烷酸、十七烷酸和十七碳烯酸的含量显著低于对照组 ($P<0.05$), 二十四碳烯酸、 α -亚麻酸、二十二碳六烯酸和 $n-3$ 多不饱和脂肪酸的含量显著高于对照组 ($P<0.05$); 精氨酸组 $n-6/n-3$ 多不饱和脂肪酸的比值显著降低 ($P<0.05$)。宏基因组分析显示, 补充精氨酸显著提高了瘤胃中梭菌属、月形单胞菌属、瘤胃球菌属和密螺旋体属的丰度 ($P<0.05$), 降低了丁酸弧菌属、副拟杆菌属、解琥珀酸菌属、甲烷短杆菌属和 *Butyrivibrio proteoclasticus* 的丰度 ($P<0.05$)。此外, 精氨酸组瘤胃中丁酸的含量显著增加 ($P<0.05$)。关联性分析显示, 丁酸弧菌属与 $n-3$ 多不饱和脂肪酸呈显著负相关 ($P<0.05$) 与饱和脂肪酸呈显著正相关 ($P<0.05$); 脂肪酸含量对肉的颜色和 pH 值有较大的影响。综上所述, 精氨酸通过降低瘤胃氢化菌的数量, 减少氢化的发生, 促进肉中有益脂肪酸沉积, 进而改善羊肉品质。研究结果为今后通过饲粮营养干预靶向调控瘤胃细菌提高羊肉品质提供参考。

关键词: 肉; 品质控制; 精氨酸; 脂肪酸谱; 瘤胃生物氢化; 绵羊

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309080

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0310-10

康乐天, 王威皓, 刘婷, 等. 精氨酸对绵羊胴体品质、肉质特性及瘤胃细菌组成的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 310-319. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309080 <http://www.tcsae.org>

KANG Letian, WANG Weihao, LIU Ting, et al. Effects of arginine on carcass traits, meat quality characteristics and rumen bacterial composition of lambs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 310-319. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309080 <http://www.tcsae.org>

0 引言

肉类产品是人类饮食的重要组成部分。羊肉瘦肉多、脂肪少、肉质细嫩多汁、易消化^[1], 富含蛋白质、钙、钾、维生素 B₁ 和不饱和脂肪酸等, 已成为人们膳食肉类的主要来源^[2]。氨基酸和脂肪酸等肉类代谢产物与肉品质密切相关。其中, 脂肪酸不仅对人体健康至关重要, 还是调节羊肉风味和口感的重要前体物质。目前, 人类对健康食品的需求不断增加, 需要摄入更少的饱和脂肪酸 (saturated fatty acids, SFA) 和更多的多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acids, PUFA)^[3]。肌肉脂肪酸的组成受多种因素的影响, 包括动物品种、基因型、性

别、饲料及肌肉类型等。营养是影响反刍动物脂肪酸组成的主要因素^[4], 因此可以通过营养策略来丰富肉中有益脂肪酸含量, 改善肉品质。精氨酸 (arginine, Arg) 是一种功能性氨基酸, 在畜禽饲养中已被广泛应用。有研究表明, 精氨酸可以减少蒸煮损失和滴水损失, 增加肌肉脂肪含量, 改善肉品质^[5-6]。HU 等^[7]将精氨酸添加到生长肥育猪饲料中发现猪的背膘厚度和背最长肌 SFA 含量降低。GUO 等^[8]发现补充精氨酸提高了猪肉中单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acids, MUFA) 和 PUFA 的含量, $n-6/n-3$ PUFA 的比值也显著降低。

瘤胃细菌可将不饱和脂肪酸 (unsaturated fatty acids, UFA) 加氢转化为 SFA, 在反刍动物瘤胃生物氢化和脂肪酸沉积中发挥着重要作用。有研究表明, 饲料中 68%~84% 的 UFA 通过细菌氢化为 SFA^[9], 其氢化程度关系到反刍动物产品 (肉、奶等) 中 PUFA 的含量^[10]。ZHANG 等^[11]研究指出, 瘤胃纤维素分解菌可以改变瘤胃液内脂肪酸的组成, 进而影响羊肉中脂肪酸的组成。XIONG 等^[12]发现瘤胃中 *Christensenellaceae_R-7_group* 的丰度与背最长肌 $n-3$ PUFA 的含量呈显著正相关。因

收稿日期: 2023-09-11 修订日期: 2023-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32160589); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目 (2022YFXZ0017); 鄂尔多斯市科技重大专项项目 (2022EEDSKJZDZX029)

作者简介: 康乐天, 研究方向为肉品科学与技术。

Email: klt191210@163.com

*通信作者: 段艳, 教授, 研究方向为肉品科学与技术。

Email: duanyan@imau.edu.cn

此，可以通过调控瘤胃细菌群落来优化肌肉中脂肪酸的组成。SI 等^[13]给梅花鹿补充适宜水平的精氨酸发现，精氨酸改变了梅花鹿瘤胃细菌群落和血清生化指标。然而，目前精氨酸对绵羊瘤胃细菌的影响未见相关报道，瘤胃细菌与绵羊肉质性状潜在变化的关系尚不清楚。因此，本研究拟利用宏基因组和气相色谱技术探究饲料补充精氨酸与绵羊肉品质及瘤胃细菌的关系，建立瘤胃细菌与肌肉脂肪酸组成的相关性，为改善羊肉品质提供新的营养干预策略。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

精氨酸为 *L*-精氨酸（纯度 99%），湖北如天生物工程有限公司；37 种脂肪酸甲酯的混合标准品，美国 Sigma 公司；挥发性脂肪酸标准品，北京中科质检生物技术有限公司；三氯甲烷（分析纯）、甲醇（分析纯）、氢氧化钠（分析纯）、三氟化硼-乙醚络合物（分析纯）、无水硫酸钠（分析纯）、氯化钠（分析纯）、硫酸（分析纯）、乙醚（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；正己烷（色谱纯），上海麦克林生化科技有限公司；TIANamp Stool DNA kit 试剂盒，天根生化科技（北京）有限公司。

1.2 仪器与设备

pH-STAR 型胴体 pH 值直测仪，德国 Matthaus 公司；C-LM3B 型数显式肌肉嫩度仪，东北农业大学工程学院；TC-P2A 全自动测色色差仪，上海生物生化实验仪器公司；RE-52AA 旋转蒸发器，上海亚荣生化仪器厂；Agilent 8 860 气相色谱仪，美国安捷伦公司。

1.3 试验方法

1.3.1 动物试验设计

本试验在内蒙古呼和浩特市和林格尔县牧场进行，选取 16 只健康无病、体质量相近 (27.07±4.82) kg 的 3 月龄杜泊×小尾寒羊杂一代绵羊，随机分为两组，每组 8 只，公母各半。对照组每日提供基础饲料，基础饲料组成及营养水平见表 1；精氨酸组在饲喂基础饲料的基础上，添加 1% 的精氨酸，饲喂前将精氨酸与基础饲料均匀混合。精氨酸添加水平根据 ZHANG 等^[14]的研究确定。试验期间自由采食和饮水，试验时间为 90 d。

1.3.2 样品采集

试验结束后，禁食 12 h，将 16 只试验羊屠宰，取瘤胃内容物，经 4 层纱布过滤，装于冻存管中，放入液氮速冻，用于瘤胃细菌和挥发性脂肪酸的测定。采集胴体 10~13 根肋间左侧背最长肌样品 500 g，用于肉品质指标及脂肪酸的测定。

1.3.3 胴体品质的测定

试验羊屠宰后，去除皮毛、头、蹄及内脏，称量记为胴体质量；剔除骨头后，剩余胴体称量记为净肉质量；背膘厚和眼肌面积参照王柏辉^[15]的方法进行测定。

1.3.4 肉品质的测定

取背最长肌样品，参照王威皓等^[16]的方法，测定宰

后 45 min 和 4 ℃ 排酸 24 h 的 pH 值、亮度 (L^*) 值、红度 (a^*) 值、黄度 (b^*) 值、蒸煮损失率和剪切力值。肉样煮前的质量记为 m_1 (g)，煮后质量记为 m_2 (g)，蒸煮损失率按下式计算：

蒸煮损失率 (%) = $(m_1 - m_2) / m_1 \times 100$ (1)

表 1 基础饲料组成及营养水平（干物质基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of basal diet (Dry matter basis)			
原料 Ingredients	含量 Content/%	营养水平 Nutrient levels ²⁾	数值 Value
玉米 Corn	44.10	代谢能 Metabolic energy/(MJ·kg ⁻¹)	12.20
玉米秸秆青贮 Corn stalk silage	37.00	粗蛋白质 Crude protein/%	15.70
豆粕 Soybean meal	15.60	粗灰分 Crude ash/%	7.70
石粉 Limestone	0.90	粗纤维 Crude fiber/%	8.00
磷酸氢钙 Calcium hydrogen	0.20	中性洗涤纤维 Neutral detergent fibre/%	26.50
食盐 Sodium chloride	0.70	酸性洗涤纤维 Neutral detergent fibre/%	17.40
赖氨酸 Lysine	0.60	钙 Calcium/%	2.40
预混料 Premix ¹⁾	0.90	总磷 Total phosphorus/%	0.55
合计 Total	100.00	赖氨酸 Lysine/%	0.60

注：1) 每千克预混料含有：维生素 A 2 000 IU，维生素 D₃ 6 000 IU，维生素 B₂ 4 mg，维生素 B₆ 10 mg，维生素 E 75 IU，铁 35 mg，硫酸铜 25 mg，氧化锌 36 mg，锰 20 mg；2) 代谢能为计算值，其余为实测值。
Note: 1) Per kg premix contained the following: vitamin A 2 000 IU, vitamin D₃ 6 000 IU, vitamin B₂ 4 mg, vitamin B₆ 10 mg, vitamin E 75 IU, Fe 35 mg, CuSO₄ 25 mg, ZnO 36 mg, Mn 20 mg; 2) Metabolic energy was a calculated value, while the others were measured values.

1.3.5 脂肪酸的测定

取背最长肌样品，参照王柏辉^[15]的方法提取脂肪酸，进行气相色谱分析。色谱柱：Rt-2 560 石英毛细柱 (100 m×0.25 mm, 0.20 μm)；升温程序：100 ℃ 保持 1 min，以 10 ℃/min 升至 180 ℃，保持 6 min，以 1 ℃/min 升至 200 ℃，保持 20 min，以 4 ℃/min 升至 230 ℃，保持 20.5 min；载气 (He) 流速 1 mL/min，进样量 1 μL，分流比 100:1；根据峰面积对单个脂肪酸进行量化，结果表示为该脂肪酸峰面积与总脂肪酸峰面积的百分比。

1.3.6 瘤胃细菌的测定

采用 TIANamp Stool DNA kit 提取瘤胃液中微生物 DNA，利用 1% 的琼脂糖凝胶电泳和 Qubit 测定 DNA 纯度、完整性和浓度。取样本的 1 μg DNA 作为模板，使用 NEBNext® Ultra DNA Library Prep Kit for Illumina 进行文库的构建。使用 Agilent 2 100 生物分析仪对文库进行质量检测，并使用 Q-PCR 方法对文库的有效浓度进行定量。由北京诺禾致源科技股份有限公司在 Illumina PE150 平台完成瘤胃细菌宏基因组测序。

1.3.7 挥发性脂肪酸的测定

参照王柏辉^[15]的方法提取瘤胃内容物的挥发性脂肪酸，采用 Agilent 8 860 气相色谱仪测定其含量。色谱柱：DB-5 石英毛细柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm)；升温程序：100 ℃ 保持 0.5 min，以 8 ℃/min 升至 180 ℃，保持 1 min，以 20 ℃/min 升至 200 ℃，保持 5 min；载气 (He) 流速 1.2 mL/min，进样量 1 μL，分流比 10:1；根据峰面积计算单个挥发性脂肪酸的含量。

1.4 数据处理与分析

数据经 Excel 2019 处理后, 利用 SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 分析, 试验结果以平均值±标准差表示, $P<0.05$ 为差异显著, 用 GraphPad Prism 8.0.2 和 Rstudio 4.1.3 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 精氨酸对绵羊胴体品质的影响

胴体品质是畜禽经济价值高低的直观表现, 也直接反映出动物的生产性能。饲料补充精氨酸后绵羊胴体品质的变化见表 2。前人在对生长猪的研究中发现, 饲料添加精氨酸不能改善其胴体品质^[17-18]。在本试验中, 精氨酸组绵羊的背膘厚相比于对照组明显降低 ($P<0.05$)。背膘厚反映了畜禽体内脂肪沉积的能力, 与瘦肉率呈负相关。与此相近, TAN 等^[19] 研究报道了精氨酸能够减少猪胴体脂肪含量, 提高背最长肌蛋白质和脂肪含量。进一步研究表明, 精氨酸对骨骼肌和皮下脂肪组织中脂质代谢相关基因的表达存在组织特异性调控, 可以促进肌肉中的脂肪合成和脂肪组织中的脂肪分解^[6]。另外, 精氨酸是 NO 的前体物质, 精氨酸的添加使得 NO 富集, 促进脂肪组织中葡萄糖和脂肪酸的氧化, 减少皮下脂肪沉积^[20]。

表 2 精氨酸对绵羊胴体品质的影响 (n=8)

Table 2 Effects of arginine on carcass traits of lambs (n=8)		
项目 Items	对照组 Control group	精氨酸组 Arginine group
胴体质量 Carcass weight/kg	25.10±5.03	24.35±3.51
净肉质量 Net meat weight/kg	13.65±1.93	13.23±1.47
背膘厚 Backfat thickness/mm	6.78±0.50 ^a	6.04±0.75 ^b
眼肌面积 Loin eye area/cm ²	15.20±2.41	17.15±2.51
屠宰率 Dressing percentage/%	48.38±2.36	48.06±3.74
净肉率 Net meat percentage/%	27.15±3.19	26.56±2.23

注: 同行数据肩标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 small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), the same as below.

2.2 精氨酸对绵羊肉品质的影响

饲料是影响羊肉品质的一个重要因素^[21-22]。肉色、持水力、嫩度和 pH 值等物理指标通常被用来评估肉品质^[22]。肉色是影响消费者选择的主要因素, 由肌红蛋白含量和 pH 值决定。 a^* 和 b^* 值的变化反映了肌红蛋白含量及其氧化还原状态^[23]。一般来说, 较低的 L^* 值与较高的 a^* 值相关, 表明肉的颜色更好, 肉质更新鲜^[1]。由表 3 可知, 精氨酸组绵羊背最长肌的 L^* 值和 b^* 值显著低于对照组 ($P<0.05$), a^* 值则显著高于对照组 ($P<0.05$), 说明精氨酸对改善绵羊肉色具有积极作用。

表 3 精氨酸对绵羊肉品质的影响 (n=8)

Table 3 Effects of arginine on meat quality of lambs (n=8)		
项目 Items	对照组 Control group	精氨酸组 Arginine group
pH _{45 min}	6.79±0.08	6.71±0.07
pH _{24 h}	5.91±0.13	5.74±0.17
亮度 L^*	33.61±1.84 ^a	31.42±0.95 ^b
红度 a^*	19.02±0.23 ^b	19.60±0.57 ^a
黄度 b^*	4.25±0.58 ^a	3.68±0.46 ^b
蒸煮损失 Cooking loss/%	24.09±2.10	22.68±3.07
剪切力 Shear force/N	71.41±5.14 ^a	63.86±4.45 ^b

嫩度被认为是羊肉最重要的品质特征, 因为它决定了肉在食用时的口感, 决定了消费者对肉的接受度和满意度^[24]。本试验中, 精氨酸组的剪切力值显著低于对照组 ($P<0.05$), 说明饲料补充精氨酸改善了羊肉的嫩度, 这与 MADEIRA 等^[25] 的研究结果一致, 即饲料补充 1% 精氨酸提高了公猪肉的嫩度及整体可接受度。肉的嫩度取决于多种因素, 包括肌纤维类型的转化、结缔组织的组成和分布、钙蛋白酶系统、肌内脂肪和胶原蛋白含量等^[26]。其中, 肌纤维直径与肉的嫩度呈负相关; I 型肌纤维占比越大, 肌肉嫩度越好。SUN 等^[27] 研究发现, 饲料补充精氨酸降低了蒙古羊肌纤维直径和横截面积, 提高了氧化型 (I 型+II A 型) 肌纤维的比例, 从而改善了肉的嫩度。此外, 蒸煮损失是反映肌肉持水能力的重要指标^[28], 本试验结果显示精氨酸组的蒸煮损失率更低 ($P>0.05$), 说明饲料补充精氨酸可能有助于减少羊肉的水分流失。

2.3 精氨酸对绵羊脂肪酸组成的影响

反刍动物脂肪酸的组成及含量受宰前饲料的调控, 精氨酸对绵羊背最长肌脂肪酸的影响见表 4。

表 4 精氨酸对绵羊背最长肌脂肪酸组成的影响 (n=8)

Table 4 Effects of arginine on fatty acid composition in longissimus dorsi muscle of lambs (n=8)		
名称 Items	对照组 Control group/%	精氨酸组 Arginine group/%
C10:0 癸酸 Capric acid	0.14±0.03	0.12±0.04
C12:0 月桂酸 Lauric acid	0.15±0.04	0.11±0.03
C14:0 肉豆蔻酸 Myristic acid	2.11±0.47	1.90±0.40
C15:0 十五烷酸 Pentadecanoic acid	0.35±0.06 ^a	0.25±0.02 ^b
C16:0 棕榈酸 Palmitic acid	23.97±1.58	23.34±1.67
C17:0 十七烷酸 Heptadecanoic acid	1.22±0.14 ^a	1.01±0.10 ^b
C18:0 硬脂酸 Stearic acid	14.92±1.21	15.18±0.79
C20:0 花生酸 Arachidic acid	0.13±0.04	0.14±0.02
饱和脂肪酸 SFA	42.89±2.72	42.15±1.81
C14:1 豆蔻油酸 Myristic acid	0.17±0.04	0.14±0.03
C16:1 棕榈油酸 Palmitoleic acid	2.06±0.30	1.98±0.32
C17:1 十七碳烯酸 Heptadecenoic acid	1.37±0.21 ^a	1.01±0.11 ^b
C18:1 n-9c 油酸 Oleic acid	39.67±1.50	40.52±1.46
C24:1 二十四碳烯酸 Tetracosenoic acid	0.31±0.06 ^b	0.53±0.10 ^a
单不饱和脂肪酸 MUFA	43.59±1.51	44.18±1.52
C18:2 n-6 亚油酸 Linoleic acid	10.53±0.90	10.18±0.46
C18:3 n-6 γ-亚麻酸 Gamma linolenic acid	0.21±0.03	0.18±0.02
C18:3 n-3 α-亚麻酸 Alpha linolenic acid	0.46±0.07 ^b	0.55±0.07 ^a
C20:2 花生二烯酸 Eicosadienoic acid	0.51±0.06	0.49±0.07
C20:3 n-6 花生三烯酸 Eicosatrienoic acid	0.23±0.08	0.18±0.03
C20:4 n-6 花生四烯酸 Arachidonic acid	2.84±0.33	2.98±0.28
C20:5 n-3 二十碳五烯酸 Eicosapentaenoic acid	0.52±0.07	0.55±0.08
C22:6 n-3 二十二碳六烯酸 Docosahexaenoic acid	0.24±0.05 ^b	0.29±0.04 ^a
多不饱和脂肪酸 PUFA	15.54±0.73	15.30±0.72
n-6 多不饱和脂肪酸 n-6 PUFA	13.81±0.79	13.21±0.67
n-3 多不饱和脂肪酸 n-3 PUFA	1.22±0.15 ^b	1.40±0.15 ^a
多不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸 PUFA/SFA	0.36±0.03	0.35±0.03
n-6/n-3 多不饱和脂肪酸 n-6/n-3 PUFA	11.51±1.94 ^a	9.55±1.15 ^b

由表 4 可知, 精氨酸组十五烷酸 (C15:0)、十七烷酸 (C17:0) 和十七碳烯酸 (C17:1) 的相对含量显著低于对照组 ($P<0.05$)。其中, C15:0 和 C17:0 属于奇数链脂肪酸, 在反刍动物肉中的含量很低, 分别小于 1% 和 2%。有研究表明, 人血浆磷脂中的奇数链 SFA 浓度与

II 型糖尿病和心血管疾病的风险呈负相关^[29]。但目前关于食用奇数链脂肪酸可能产生的影响及其潜在作用机制的研究有限。本试验中，精氨酸组二十四碳烯酸（C24:1）的相对含量显著高于对照组（ $P<0.05$ ）。C24:1 又称神经酸，是一种在大脑髓鞘生物合成中起重要作用的 MUFA，可以作为大脑成熟的指标，具有促进大脑发育、提高记忆力、延缓大脑衰老等重要的生物学功能^[30]。

肉中的 PUFA 多为功能性脂肪酸，不仅具有广泛的生物学作用，还因存在多个双键结构（C=C），易被氧化产生风味物质。本研究发现，两组绵羊间 $n-6$ PUFA 相对含量无显著性差异（ $P>0.05$ ），但精氨酸组 α -亚麻酸（C18:3 $n-3$ ）、二十二碳六烯酸（DHA，C22:6 $n-3$ ）和 $n-3$ PUFA 的相对含量均显著高于对照组（ $P<0.05$ ）。 α -亚麻酸是最主要的 $n-3$ PUFA 和必需脂肪酸，可以通过一系列的去饱和和延伸反应合成二十碳五烯酸（EPA，C20:5 $n-3$ ）和 DHA。有研究发现，在羔羊饲料里添加亚麻籽增加了肌肉中长链 $n-3$ PUFA 的比例，包括 EPA 和 DHA^[31]。长链 $n-3$ PUFA、EPA 和 DHA 在预防心血管疾病、代谢和炎症疾病以及癌症方面具有强大作用^[32]。此外，醛类、醇类和酮类风味物质主要由脂肪酸氧化形成， α -亚麻酸水平与肉中醛类的浓度有关^[33]，其也是 1-辛烯-3-醇的来源^[34]。PUFA/SFA 和 $n-6/n-3$ PUFA 比值通常被用来评估脂肪的营养价值，补充精氨酸显著降低了背最长肌 $n-6/n-3$ PUFA 的比值（ $P<0.05$ ），表明精氨酸组的羊肉更符合人类健康标准，这与 GUO 等^[8]的研究结果一致。

2.4 精氨酸对绵羊瘤胃细菌的影响

精氨酸对瘤胃细菌 α -多样性的影响见表 5，两组间 Shannon 指数、Simpson 指数和 Chao1 指数均无显著性差异（ $P>0.05$ ），表明精氨酸不影响瘤胃菌群的 α -多样性。利用主坐标分析（principal co-ordinates analysis, PCoA）和非度量多维尺度（non-metric multidimensional scaling, NMDS）分析菌群的 β -多样性（图 1），PCoA 分析中，与对照组相比，精氨酸组样本出现明显的偏移且无重叠；NMDS 分析结果显示两组间没有完全分离。以上分析显示两组菌群构成之间存在一定的差异，说明精氨酸的干预改变了瘤胃细菌的组成。

表 5 精氨酸对绵羊瘤胃细菌 α -多样性的影响（ $n=6$ ）

Table 5 Effects of arginine on rumen bacterial α -diversity in lambs ($n=6$)

项目 Items	对照组 Control group	精氨酸组 Arginine group
Shannon 指数 Shannon index	8.36±0.80	8.28±0.58
Simpson 指数 Simpson index	0.99±0.01	0.99±0.01
Chao1 指数 Chao1 index	7 840.77±538.78	7 759.47±215.78

进一步分析瘤胃细菌在门和属水平上的群落组成，由图 2a 可知，门水平上，两组间优势菌均为厚壁菌门（Firmicutes）、拟杆菌门（Bacteroidetes）和变形菌门（Proteobacteria），占菌门相对丰度的 60% 以上，这与文献报道一致^[35]。由图 2b 可知，属水平上，两组间优势菌依次为普雷沃氏菌属（*Prevotella*）、拟杆菌属

（*Bacteroides*）、梭菌属（*Clostridium*）、另枝菌属（*Alistipes*）和月形单胞菌属（*Selenomonas*），占菌属相对丰度的 25% 以上。图 2c 显示精氨酸组厚壁菌门/拟杆菌门的比值（F/B）相较于对照组显著降低（ $P<0.05$ ）。前人研究报道，F/B 比值的升高易引起肠易激综合征（irritable bowel syndrome, IBS）的发生^[36]；肥胖的发生也伴随着 F/B 比值的增加^[37]。因此，精氨酸可能通过增加拟杆菌门数量，减少厚壁菌门数量，调节微生物与宿主代谢平衡从而降低绵羊背膘厚，减少胴体脂肪沉积。

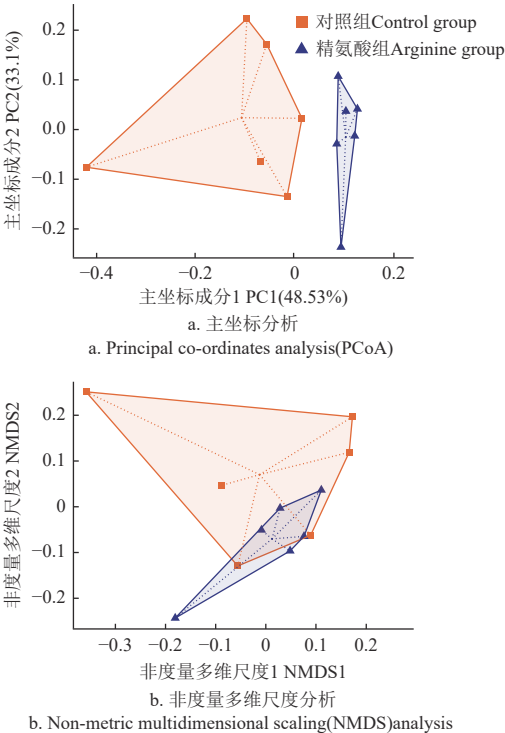
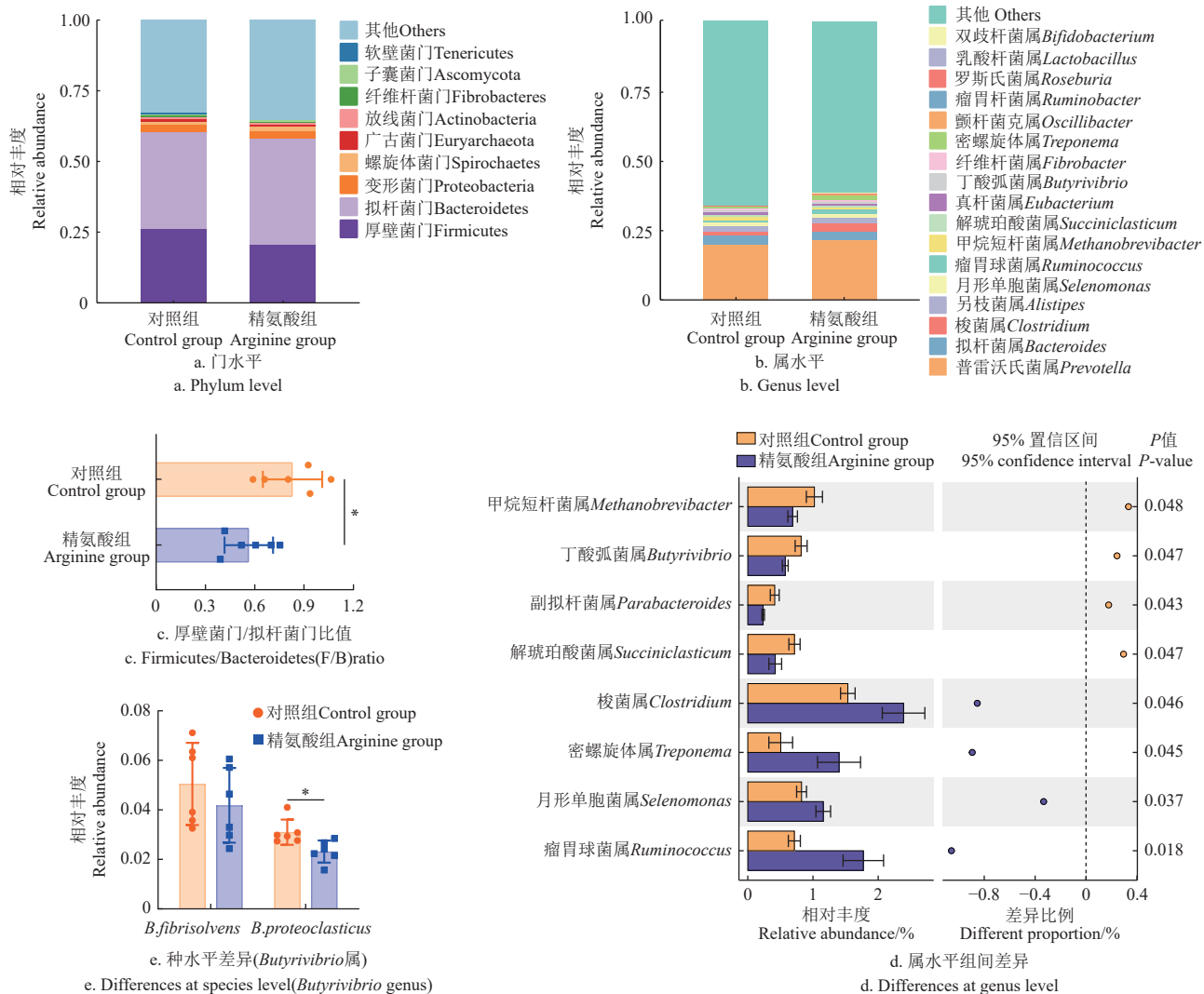


图 1 精氨酸对绵羊瘤胃细菌 β -多样性的影响（ $n=6$ ）
Fig.1 Effects of arginine on rumen bacterial β -diversity in lambs ($n=6$)

进一步比较了两组瘤胃细菌属水平上的组成差异，由图 2d 的组间差异判别分析可知，相比对照组，精氨酸组的梭菌属、月形单胞菌属、密螺旋体属（*Treponema*）和瘤胃球菌属（*Ruminococcus*）的相对丰度显著增加（ $P<0.05$ ）。梭菌属、月形单胞菌属和瘤胃球菌属均与瘤胃脂质代谢有关^[38]。梭菌属含有纤维素和淀粉分解菌，能产生乙酸和丁酸，是胃肠道共栖菌，通过与其他微生物的相互作用，在微生物群落内稳态中起着至关重要的作用。SI 等^[13]发现，精氨酸的补充抑制了梭菌属在梅花鹿瘤胃中的定植，这与本研究结果不一致。瘤胃球菌是厚壁菌门中重要的纤维分解菌，通过产生多种类型的纤维素酶和半纤维素酶降解植物细胞壁中的半纤维素、果胶和纤维素。此外，密螺旋体属与脂肪酸氢化和纤维降解也有关^[39]。由上可知，补充精氨酸提高了绵羊瘤胃分解纤维素的能力。ZHANG 等^[11]研究表明，与纤维素分解菌低丰度组相比，高丰度组羔羊肉中 C17:0 的比例显著降低，这与本试验结果一致。本研究还发现精氨酸降低了丁酸

弧菌属 (*Butyrivibrio*)、副拟杆菌属 (*Parabacteroides*)、解琥珀酸菌属 (*Succiniclasticum*) 和甲烷短杆菌属 (*Methanobrevibacter*) 的相对丰度 ($P<0.05$)。在瘤胃中, 丁酸弧菌属将 C18:2 *n*-6 和 C18:3 *n*-3 广泛地生物加氢成 C18:0, 不利于 PUFA 在组织里的沉积。溶纤维丁酸弧菌 (*Butyrivibrio fibrisolvens*) 和 *Butyrivibrio proteoclasticus* 属于丁酸弧菌属, 已被证明是参与 C18 不饱和脂肪酸氢化的主要细菌。溶纤维丁酸弧菌将 C18:2 *n*-6 异构化为 *cis*-9, *trans*-11 C18:2, 进一步氢化为 *trans*-11 C18:1; *Butyrivibrio proteoclasticus* 在氢化最后一步中起着重要作用, 将 *trans* C18:1 还原为 C18:0。此外, *Butyrivibrio proteoclasticus* 还可利用 EPA 和 DHA 进行生物氢化^[40]。在这过程中形成的氢化中间体, 如共轭亚油酸 (*cis*-9, *trans*-11 C18:2)

和 *trans*-11 C18:1 在人体健康中发挥重要作用。图 2e 分析了这两种菌的组间差异, 相比对照组, 精氨酸组中两种菌的相对丰度均降低, 其中 *Butyrivibrio proteoclasticus* 显著降低 ($P<0.05$), 说明精氨酸通过降低瘤胃氢化菌的丰度, 减少了氢化的发生, 且抑制氢化的最后一步, 使脂肪酸不完全氢化, 从而使更多的 PUFA 及其氢化中间体流出瘤胃, 到达十二指肠后被上皮吸收, 通过血液循环进入外周组织, 促进其在肌肉中的积累。甲烷短杆菌属是瘤胃中最主要的产甲烷菌, 可以利用纤维素分解菌产生的氢作为电子供体产生甲烷^[41], 加剧温室效应。本研究中, 精氨酸降低了甲烷短杆菌属的丰度, 这与前人研究结果相近, 即适宜水平的精氨酸能够降低梅花鹿瘤胃中甲烷短杆菌属丰度^[42]。



注: *表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: * means significant difference ($P<0.05$).

图 2 精氨酸对绵羊瘤胃细菌群落组成的影响 ($n=6$)

Fig.2 Effects of arginine on rumen bacterial community composition in lambs ($n=6$)

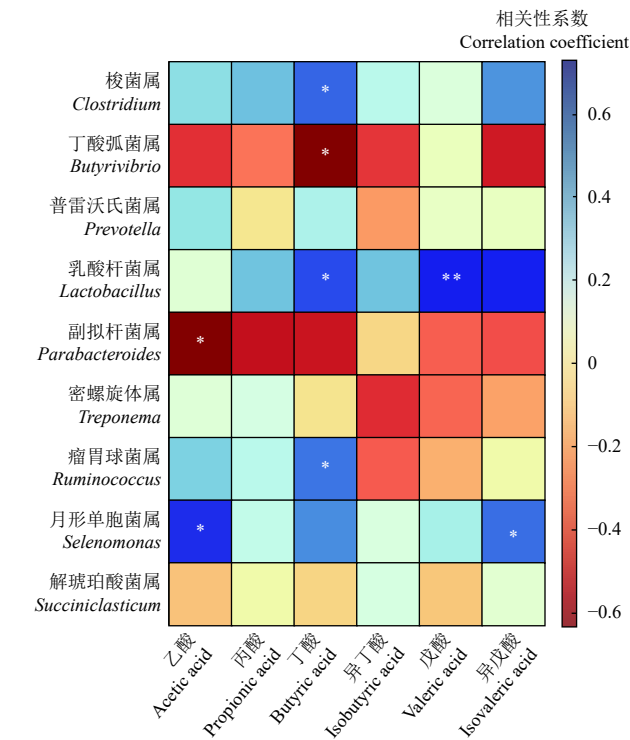
挥发性脂肪酸是瘤胃细菌的主要代谢物, 其含量受细菌群落组成变化的影响。由表 6 可知, 精氨酸组丁酸的含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。丁酸是瘤胃上皮细胞的重要能量来源, 可通过抑制组蛋白去乙酰化、促进胰高血糖素样肽-1 (GLP-1) 分泌、过氧化物酶体增殖物

激活受体- γ (peroxisome proliferator-activated receptor- γ , PPAR- γ) 通路激活等多种机制调控脂质代谢相关基因的表达^[43]。为了进一步明确与挥发性脂肪酸相关的细菌, 对瘤胃细菌与挥发性脂肪酸进行了相关性分析, 结果见图 3。丁酸与梭菌属、乳酸杆菌属 (*Lactobacillus*) 及瘤

胃球菌属呈显著正相关 ($P<0.05$)，月形单胞菌属与乙酸和异戊酸呈显著正相关 ($P<0.05$)。这表明梭菌、乳酸杆菌、瘤胃球菌和月形单胞菌可能参与了瘤胃代谢产生挥发性脂肪酸的过程。梭菌属和瘤胃球菌属含有纤维素和淀粉分解细菌，梭菌能够产生乙酸和丁酸等^[44]，瘤胃球菌主要产生丁酸^[45]，以上的相关性分析结果与先前结论一致。丁酸弧菌属与丁酸含量呈显著负相关 ($P<0.05$)，这与丁酸弧菌主要产生丁酸的结论相反，这可能是因为丁酸的含量是瘤胃里多种产丁酸菌共同代谢的结果，丁酸弧菌丰度的降低不会影响丁酸的整体水平。

表 6 精氨酸对绵羊瘤胃挥发性脂肪酸含量的影响 ($n=6$)
Table 6 Effects of arginine on rumen volatile fatty acid contents in lambs ($n=6$)

项目 Items	对照组 Control group/(mmol·L ⁻¹)	精氨酸组 Arginine group/(mmol·L ⁻¹)
乙酸 Acetic acid	36.94±4.37	42.38±5.52
丙酸 Propionic acid	17.14±4.85	21.85±4.84
丁酸 Butyric acid	8.77±2.71 ^b	12.41±2.73 ^a
异丁酸 Isobutyric acid	2.83±0.57	3.14±0.71
戊酸 Valeric acid	3.63±1.02	4.16±0.90
异戊酸 Isovaleric acid	3.23±0.85	3.96±0.92



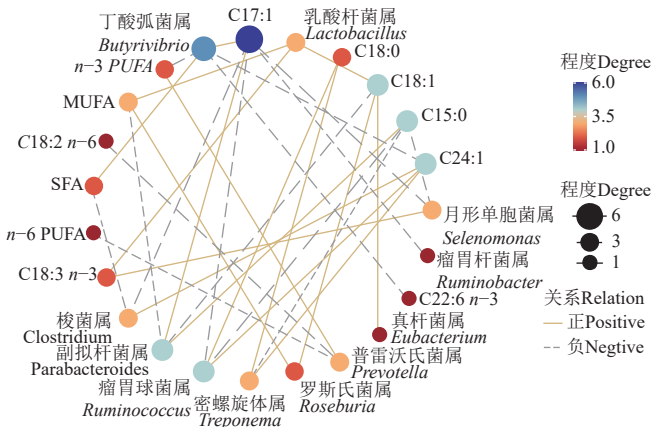
注：*表示差异显著 ($P<0.05$)，**表示差异极显著 ($P<0.01$)，下同。
Note: * means significant difference ($P<0.05$), ** means extremely significant difference ($P<0.01$), the same as below.

图 3 瘤胃细菌与挥发性脂肪酸相关性热图
Fig.3 Heat map of correlation between rumen bacteria and volatile fatty acids

2.5 瘤胃细菌与脂肪酸组成的相关性分析

瘤胃细菌氢化会导致 SFA 在反刍动物肉中的积累，降低细菌氢化已成为提高肉质的重要途径，因此有必要进一步探究优势细菌与脂肪酸代谢的关系，以明确其对脂肪酸沉积的影响。本试验基于前面的研究结果进行了瘤胃细菌与脂肪酸组成的相关性分析，由图 4 可以看

出，瘤胃细菌与脂肪酸组成之间存在明显的关联性。丁酸弧菌属与 $n-3$ PUFA、C22:6 $n-3$ 及 C24:1 呈显著负相关 ($P<0.05$)，与 SFA 呈显著正相关 ($P<0.05$)，如上文所述，丁酸弧菌属是瘤胃中主要的氢化菌，其两个菌种（溶纤维丁酸弧菌、*Butyrivibrio proteoclasticus*）负责不同的氢化途径，影响着脂肪酸氢化的程度。除了丁酸弧菌属外，普雷沃氏菌属、梭菌属和瘤胃球菌属在生物氢化中也起到一定的作用^[46]。普雷沃氏菌属与 $n-3$ PUFA 呈显著正相关 ($P<0.05$)，与 $n-6$ PUFA 和 C18:2 $n-6$ 呈显著负相关 ($P<0.05$)。有研究发现，普雷沃氏菌属与 PUFA 含量呈正相关，与 SFA 含量呈负相关^[47]，这可能是因为普雷沃氏菌在瘤胃系统的能量收集中起着重要作用，并为 UFA 的合成提供前体^[48]。梭菌属与 SFA 呈显著负相关 ($P<0.05$)，瘤胃球菌属与 C18:0 呈显著正相关 ($P<0.05$)，还需进一步研究这两种菌属与脂肪酸氢化的关系。乳酸杆菌属与 C18:3 $n-3$ 、C18:1 及 MUFA 呈显著正相关 ($P<0.05$)，这与王威皓等^[16]的分析结果一致，他们还发现乳酸杆菌属与 C18:2 $n-6$ 呈负相关。这是因为乳酸杆菌属能够将 C18:2 $n-6$ 异构化为 *cis*-9, *trans*-11 C18:2，进一步氢化使得中间产物 C18:1 比例增加。有研究发现添加乳酸杆菌属能够增加羊乳中 *cis*-9, *trans*-11 C18:2 含量^[49]，可能是因为该菌属具有较高的 C18:2 $n-6$ 异构化酶活性。副拟杆菌属与 C18:1 和 MUFA 呈显著负相关 ($P<0.05$)，与 C15:0 呈显著正相关 ($P<0.05$)。饱和支链脂肪酸可由副拟杆菌属代谢合成，是导致膻味的主要成分，影响羊肉的整体风味。以上这些细菌属对瘤胃的生物氢化至关重要，它们可以改变 UFA 的氢化进程，影响 PUFA 及其氢化中间产物在组织的积累。除了瘤胃氢化菌影响机体脂肪酸沉积外，脂肪代谢相关基因在调控脂肪酸代谢中也起到重要作用。因此，今后的研究可以结合这两个角度进一步挖掘影响肌肉脂肪酸沉积的关键因子。



注：黄色实线表示显著正相关 ($P<0.05$)，灰色虚线表示显著负相关 ($P<0.05$)；线条的粗细代表相关性的强弱；节点大小和颜色深浅代表相关对象的个数。
Note: The yellow solid line indicates a significant positive correlation ($P<0.05$), and the gray dashed line indicates a significant negative correlation ($P<0.05$). The thickness of the lines represents the strength of the correlation. The node size and color shade represent the number of related objects.

图 4 瘤胃细菌与脂肪酸组成相关性网络图
Fig.4 Network diagram of correlation between rumen bacteria and fatty acid composition

2.6 脂肪酸组成与肉品质的相关性分析

肌肉脂肪酸谱是从营养和健康角度评价肉品质的一个关键因素。图5为脂肪酸组成与肉品质指标间的相关性热图,由图可以看出,脂肪酸与肉品质间存在一定的关联性。绵羊背最长肌主要的SFA是C16:0和C18:0,但本研究分析发现C16:0和C18:0对肉质影响较小。而中长链SFA(C10~C16)对肉色的影响较大,其与 L^* 呈显著正相关($P<0.05$),与 a^* 呈显著负相关($P<0.05$)。有研究发现, L^* 和 b^* 均与SFA含量呈正相关^[50],这与本研究结果相近。在MUFA中,C24:1和C17:1对肉品质的影响较大,其中C24:1与蒸煮损失呈显著负相关($P<0.05$),与 a^* 呈显著正相关($P<0.05$)。 pH_{24h} 与C22:6 $n-3$ 和C18:3 $n-3$ 呈显著负相关($P<0.05$),这与DUAN等^[51]的分析结果一致。此外, $n-3$ PUFA与 L^* 和剪切力呈显著负相关($P<0.05$),与 a^* 呈显著正相关($P<0.05$),增加肌肉中 $n-3$ PUFA的含量将有助于改善羊肉的色泽和嫩度。以上结果表明,肉质性状受到脂肪酸不同程度的影响,特别是肉色和pH值。

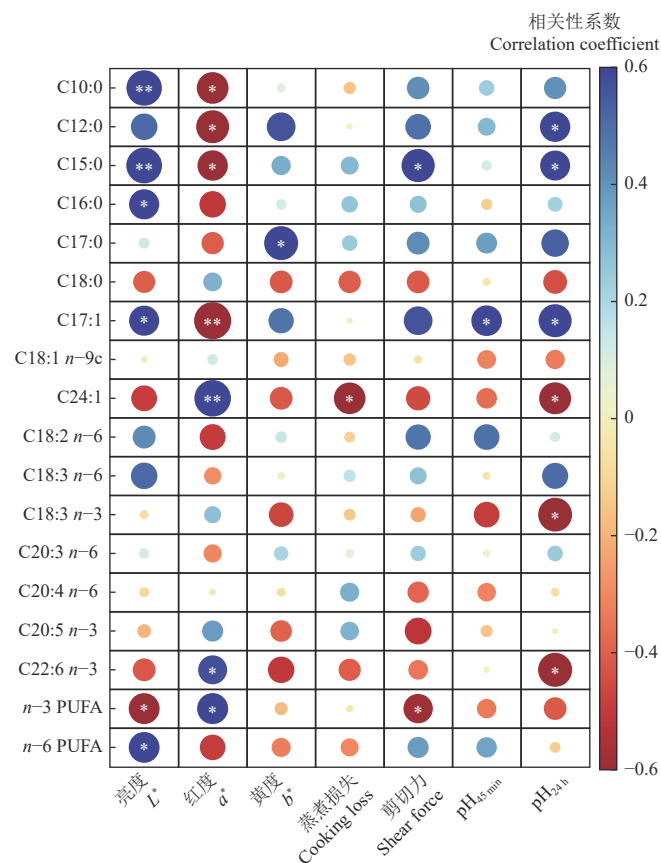


图5 脂肪酸组成与肉品质相关性热图

Fig.5 Heat map of correlation between fatty acid composition and meat quality

3 结论

1) 饲料补充精氨酸降低了绵羊的背膘厚度,改善了背最长肌的色泽及嫩度,提高了肉中神经酸、 α -亚麻酸、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)和 $n-3$ 多不饱和脂肪酸的水平,降低了 $n-6/n-3$ 多不饱和脂肪酸

的比例,最终提升了羊肉的品质和营养价值。

2) 饲料补充精氨酸改变了绵羊瘤胃细菌群落的组成,尤其降低了氢化菌的丰度,如丁酸弧菌属和 *Butyrivibrio proteoclasticus*。

3) 瘤胃部分关键菌与脂肪酸存在较强的关联性,其中丁酸弧菌与 $n-3$ 多不饱和脂肪酸显著负相关($P<0.05$),与饱和脂肪酸显著正相关($P<0.05$)。说明氢化细菌丰度的变化影响生物氢化发生的程度,最终影响脂肪酸在肌肉中的沉积。

本研究揭示了与脂肪酸氢化相关的特定菌属,为通过靶向调控瘤胃细菌优化机体脂肪酸沉积提供了见解。然而,需要进一步分析瘤胃内容物脂肪酸谱的变化,更详细地研究瘤胃细菌与脂肪酸代谢之间的关系。后期还可以进一步探究精氨酸与其他饲料成分的相互作用对羊肉品质改善效果的影响,以期将研究发现有效地应用于肉羊饲料开发与养殖生产中。

[参考文献]

- [1] MENG M, LI X, HUO R, et al. Effects of dietary disodium fumarate supplementation on muscle quality, chemical composition, oxidative stress and lipid metabolism of Hu sheep induced by high concentrate diet[J]. *Meat Science*, 2023, 201: 109176.
- [2] LIANG Y, BAO Y, GAO X, et al. Effects of spirulina supplementation on lipid metabolism disorder, oxidative stress caused by high-energy dietary in Hu sheep[J]. *Meat Science*, 2020, 164: 108094.
- [3] MURARIU O C, MURARIU F, FRUNZA G, et al. Fatty acid indices and the nutritional properties of Karakul sheep meat[J]. *Nutrients*, 2023, 15(4): 1061.
- [4] Wang B H, Luo Y L, Wang Y, et al. Rumen bacteria and meat fatty acid composition of Sunit sheep reared under different feeding regimens in China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(3): 1100-1110.
- [5] SHI H, KIM J K, KIM I H. Effects of dietary *L*-arginine on growth performance, nutrient digestibility, gas emission, and meat quality in finishing pigs[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 253: 93-100.
- [6] TAN B, YIN Y, LIU Z, et al. Dietary *L*-arginine supplementation differentially regulates expression of lipid-metabolic genes in porcine adipose tissue and skeletal muscle[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2011, 22(5): 441-445.
- [7] HU C J, JIANG Q Y, ZHANG T, et al. Dietary supplementation with arginine and glutamic acid modifies growth performance, carcass traits, and meat quality in growing-finishing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2017, 95(6): 2680-2689.
- [8] GUO Q, KONG X, HU C, et al. Fatty acid content, flavor compounds, and sensory quality of pork loin as affected by dietary supplementation with *L*-arginine and glutamic acid[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(12): 3445-3453.

- [9] GILLIS M H, DUCKETT S K, SACKMANN J R. Effects of supplemental rumen-protected conjugated linoleic acid or corn oil on fatty acid composition of adipose tissues in beef cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(5): 1419-1427.
- [10] MAGAN J B, O' CALLAGHAN T F, KELLY A L, et al. Compositional and functional properties of milk and dairy products derived from cows fed pasture or concentrate - based diets[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(3): 2769-2800.
- [11] ZHANG Z, NIU X, LI F, et al. Ruminal cellulolytic bacteria abundance leads to the variation in fatty acids in the rumen digesta and meat of fattening lambs[J]. *Journal of Animal Science*, 2020, 98(7): 1-8.
- [12] XIONG Y, GUO C, WANG L, et al. Effects of paper mulberry silage on the growth performance, rumen microbiota and muscle fatty acid composition in hu lambs[J]. *Fermentation*, 2021, 7(4): 286-300.
- [13] SI H, LIU H, NAN W, et al. Effects of arginine supplementation on serum metabolites and the rumen bacterial community of sika deer (*Cervus nippon*)[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2021, 8: 630686.
- [14] ZHANG H, ZHENG P, CHEN D, et al. Dietary arginine supplementation improves intestinal mitochondrial functions in low-birth-weight piglets but not in normal-birth-weight piglets[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(12): 1995.
- [15] 王柏辉. 饲养方式对苏尼特羊胃肠道菌群、脂肪酸代谢和羊肉品质的影响及机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- WANG Bohui. Effects of Feeding Regimens on Gastrointestinal Microbiota, Fatty Acid Metabolism and Meat Quality of Sunit Sheep and Its Underlying Mechanism[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王威皓, 窦露, 康乐天, 等. 日粮添加丁酸梭菌对小尾寒羊脂肪酸代谢和肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(19): 1-9.
- WANG Weihao, DOU Lu, KANG Letian, et al. Effects of dietary *Clostridium butyricum* on fatty acid metabolism and meat quality of Small-tailed Han sheep[J]. *Food Science*, 2023, 44(19): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [17] MA X, LIN Y, JIANG Z, et al. Dietary arginine supplementation enhances antioxidative capacity and improves meat quality of finishing pigs[J]. *Amino Acids*, 2010, 38(1): 95-102.
- [18] 周招洪, 陈代文, 郑萍, 等. 饲料能量和精氨酸水平对育肥猪生长性能、胴体性状和肉品质的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2013, 49(15): 40-45.
- ZHOU Zhaohong, CHEN Daiwen, ZHENG Ping, et al. Effect of dietary energy and arginine levels on growth performance, carcass traits and meat quality of finishing pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2013, 49(15): 40-45. (in Chinese with English abstract)
- [19] TAN B, YIN Y, LIU Z, et al. Dietary *L*-arginine supplementation increases muscle gain and reduces body fat mass in growing-finishing pigs[J]. *Amino Acids*, 2009, 37: 169-175.
- [20] YE C, ZENG X, ZHU J, et al. Dietary *N*-carbamylglutamate supplementation in a reduced protein diet affects carcass traits and the profile of muscle amino acids and fatty acids in finishing pigs[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(28): 5751-5758.
- [21] 陈晓雨, 窦露, 华晓青, 等. 基于 Akt 信号通路探究益生菌对绵羊蛋白质合成及风味的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(2): 212-221.
- CHEN Xiaoyu, DOU Lu, HUA Xiaoqing, et al. Effects of probiotics on the protein synthesis and flavor of lambs based on Akt signaling pathway[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(2): 212-221. (in Chinese with English abstract)
- [22] 罗玉龙, 剧柠, 常江, 等. α -硫辛酸对滩羊肌纤维类型和肉品质的影响及其调控机理[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 333-341.
- LUO Yulong, JU Ning, CHANG Jiang, et al. Effects of α -lipoic acid on muscle fiber type composition and meat quality of tan sheep and underlying regulatory mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(1): 333-341. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2020, 104(2): 418-430.
- [24] ZHANG X, HAN L, HOU S, et al. Effects of different feeding regimes on muscle metabolism and its association with meat quality of Tibetan sheep[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131611.
- [25] MADEIRA M S, ALFAIA C M, COSTA P, et al. The combination of arginine and leucine supplementation of reduced crude protein diets for boars increases eating quality of pork[J]. *Journal of Animal Science*, 2014, 92(5): 2030-2040.
- [26] WARNER R, MILLER R, HA M, et al. Meat tenderness: underlying mechanisms, instrumental measurement, and sensory assessment[J]. *Meat and Muscle Biology*, 2021, 4(2): 1-25.
- [27] SUN L, XU L, ZHAO L, et al. Dietary *L*-arginine supplementation influences the muscle fiber characteristics and meat quality of Mongolian sheep through the NO/AMPK/PGC-1 α pathway[J]. *Food Bioscience*, 2023, 52: 102446.
- [28] 刘婷, 靳烨, 要铎, 等. 植物乳杆菌对苏尼特羊肠道菌群、血浆代谢物及肉品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(3): 286-294.
- LIU Ting, JIN Ye, YAO Duo, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* on intestinal flora, plasma metabolites and meat quality of Sunit sheep[J]. *Transactions of the Chinese Society*

- of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 286-294. (in Chinese with English abstract)
- [29] PFEUFFER M, JAUDSZUS A. Pentadecanoic and heptadecanoic acids: Multifaceted odd-chain fatty acids[J]. *Advances in Nutrition*, 2016, 7(4): 730-734.
- [30] LI Q, CHEN J, YU X, et al. A mini review of nervonic acid: Source, production, and biological functions[J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125286.
- [31] ANDRES S, MORAN L, ALDAI N, et al. Effects of linseed and quercetin added to the diet of fattening lambs on the fatty acid profile and lipid antioxidant status of meat samples[J]. *Meat Science*, 2014, 97(2): 156-163.
- [32] TROESCH B, EGGERSDORFER M, LAVIANO A, et al. Expert opinion on benefits of long-chain omega-3 fatty acids (DHA and EPA) in aging and clinical nutrition[J]. *Nutrients*, 2020, 12(9): 2555.
- [33] ELMORE J S, COOPER S L, ENSER M, et al. Dietary manipulation of fatty acid composition in lamb meat and its effect on the volatile aroma compounds of grilled lamb[J]. *Meat Science*, 2005, 69(2): 233-242.
- [34] MEZGEBO G B, MONAHAN F J, MCGEE M, et al. Fatty acid, volatile and sensory characteristics of beef as affected by grass silage or pasture in the bovine diet[J]. *Food Chemistry*, 2017, 235: 86-97.
- [35] 周力, 高占红, 张峰硕, 等. 小麦型饲料中添加木聚糖酶对藏羊羔羊生长性能、瘤胃挥发性脂肪酸、细菌组成及肉质性状的影响[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(10): 46-55. ZHOU Li, GAO Zhanhong, ZHANG Fengshuo, et al. Effects of adding xylanase in wheat type diet on growth performance, rumen volatile fatty acid, bacterial composition and meat quality trait of Tibetan lamb[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(10): 46-55. (in Chinese with English abstract)
- [36] JEFFERY I B, DAS A, O'HERLIHY E, et al. Differences in fecal microbiomes and metabolomes of people with vs without irritable bowel syndrome and bile acid malabsorption[J]. *Gastroenterology*, 2020, 158(4): 1016-1028.
- [37] LI A, WANG N, LI N, et al. Modulation effect of *chenpi* extract on gut microbiota in high - fat diet - induced obese C57BL/6 mice[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2021, 45(4): e13541.
- [38] EDWARDS H D, ANDERSON R C, TAYLOR T M, et al. Interactions between oil substrates and glucose on pure cultures of ruminal lipase-producing bacteria[J]. *Lipids*, 2013, 48: 749-755.
- [39] WENNER B A, PARK T, MITCHELL K, et al. Effect of zinc source (zinc sulfate or zinc hydroxychloride) on relative abundance of fecal *Treponema* spp. in lactating dairy cows[J]. *JDS Communications*, 2022, 3(5): 334-338.
- [40] JEYANATHAN J, ESCOBAR M, WALLACE R J, et al. Biohydrogenation of 22: 6 *n*-3 by *Butyrivibrio proteoclasticus* P18[J]. *BMC Microbiology*, 2016, 16: 1-12.
- [41] WANG B, MA M P, DIAO Q Y, et al. Saponin-induced shifts in the rumen microbiome and metabolome of young cattle[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 356.
- [42] 范玉洁. 精氨酸水平对离乳期梅花鹿生长性能、瘤胃发酵和菌群结构的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. FAN Yujie. Effects of Arginine Level on Growth Performance, Rumen Fermentation and Flora Structure of Sika Deer during Weaning Period[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [43] GAO F, LV Y W, LONG J, et al. Butyrate improves the metabolic disorder and gut microbiome dysbiosis in mice induced by a high-fat diet[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2019, 10: 1040.
- [44] GUO C, WU Y, LI S, et al. Effects of different forage types on rumen fermentation, microflora, and production performance in peak-lactation dairy cows[J]. *Fermentation*, 2022, 8(10): 507.
- [45] LI Z, QIU H, LAN X, et al. Appropriate particle size of rice straw promoted rumen fermentation and regulated bacterial microbiota in a rumen simulation technique system[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, 10: 1185191.
- [46] HUWA S A, KIM E J, LEE M R F, et al. As yet uncultured bacteria phylogenetically classified as *Prevotella*, *Lachnospiraceae* incertae sedis and unclassified *Bacteroidales*, *Clostridiales* and *Ruminococcaceae* may play a predominant role in ruminal biohydrogenation[J]. *Environmental Microbiology*, 2011, 13(6): 1500-1512.
- [47] WANG Y, LI T, CHEN X, et al. Preliminary investigation of mixed orchard hays on the meat quality, fatty acid profile, and gastrointestinal microbiota in goat kids[J]. *Animals*, 2022, 12(6): 780.
- [48] ZHANG X L, XU T W, WANG X G, et al. Effect of dietary protein levels on dynamic changes and interactions of ruminal microbiota and metabolites in yaks on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 684340.
- [49] APAS A L, ARENA M E, COIOBMO S, et al. Probiotic administration modifies the milk fatty acid profile, intestinal morphology, and intestinal fatty acid profile of goats[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(1): 47-54.
- [50] 张月, 郭月英, 要铎, 等. 日粮添加乳酸菌对苏尼特羊脂质代谢及肉品质的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 151-160. ZHANG Yue, GUO Yueying, YAO Duo, et al. Effect of adding lactic acid bacteria in diet on lipid metabolism and meat quality of Sunit sheep[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 151-160. (in Chinese with English abstract)
- [51] DUAN Y H, ZHENG C B, ZHENG J, et al. Profiles of muscular amino acids, fatty acids, and metabolites in Shaziling pigs of different ages and relation to meat quality[J]. *Science China (Life Sciences)*, 2023, 66(6): 1323-1339.

Effects of arginine on carcass traits, meat quality characteristics and rumen bacterial composition of lambs

KANG Letian^{1,2}, WANG Weihao^{1,2}, LIU Ting^{1,2}, ZHANG Taiwu^{1,2}, ZHAO Xin^{1,2}, ZHAI Maoqin^{1,2},
LI Jun³, JIN Ye^{1,2}, DUAN Yan^{1,2}✉

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

2. Integrative Research Base of Beef and Lamb Processing Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot 010018, China;

3. Inner Mongolia Sunite Right Banner Rongyu Modern Ecological Animal Husbandry Co., Ltd, Sunite Right Banner 011200, China)

Abstract: Rumen bacteria can play an important role in the fatty acid deposition in the skeletal muscle of lambs. This study aims to explore the effects of arginine on carcass traits, meat quality, and rumen bacterial composition of lambs. The relationship between rumen bacteria and fatty acid deposition was also determined using metagenomic and gas chromatographs. Among them, metagenomic technology was used to analyze the changes in rumen bacteria after arginine supplementation in lambs. The gas chromatograph was to identify the fatty acid profile in the sheep muscle. The correlation between ruminal bacteria and muscle fatty acids was established after the experiment. Sixteen healthy lambs (three months old) with similar body weight were randomly divided into the control group (basal diet) and the arginine group (basal diet + 1% arginine). The feeding trial lasted for 90 days. The carcass traits were determined to calculate the related indexes after slaughter. Rumen contents were frozen and stored in liquid nitrogen at -80 °C for metagenomic analysis of rumen bacteria and volatile fatty acids. Samples were collected from the left longissimus dorsi muscle of the carcass, one part of which was used to determine meat quality, and another part was stored at -20 °C for the fatty acid composition. The results showed that there was a significant decrease in the backfat thickness of lambs in arginine ($P < 0.05$), the lightness (L^*), yellow (b^*), and shear force of longissimus dorsi muscle ($P < 0.05$), whereas, the redness (a^*) value significantly increased ($P < 0.05$), compared with the control group. Dietary arginine supplementation improved the color and tenderness of meat, indicating a positive effect on meat quality. The contents of pentadecanoic acid, heptadecanoic acid, and heptadecenoic acid in the arginine group were significantly lower than those in the control group ($P < 0.05$). By contrast, the contents of tetracosenoic acid, α -linolenic acid, docosahexaenoic acid, and n -3 polyunsaturated fatty acids (PUFA) in the arginine group were significantly higher than those in the control group ($P < 0.05$). The n -6/ n -3 PUFA ratio in the arginine group decreased significantly ($P < 0.05$). As such, the arginine enhanced the nutritional value of mutton more conducive to human health. Metagenomic analysis showed that the supplementation with arginine significantly increased the abundance of *Clostridium*, *Selenomonas*, *Ruminococcus*, and *Treponema* in rumen ($P < 0.05$). The abundance of *Butyrivibrio*, *Parabacteroides*, *Succiniclasicum*, *Methanobrevibacter*, and *Butyrivibrio proteoclasticus* decreased significantly ($P < 0.05$). In addition, the content of butyric acid increased significantly ($P < 0.05$) in the rumen of the arginine group. Dietary supplementation with arginine relatively affected the rumen bacterial community of lambs for the composition of bacterial metabolites. Arginine supplementation promoted the fermentation and degradation of rumen cellulose in lambs. Some key bacteria were significantly correlated with the fatty acid composition, among which *Butyrivibrio* shared a significant negative correlation with n -3 PUFA ($P < 0.05$), while a significant positive correlation with the saturated fatty acids ($P < 0.05$). Therefore, the rumen bacteria greatly contributed to the hydrogenation of fatty acids. In short, the abundance of hydrogenating bacteria was dominated in the presence of biohydrogenation, leading to the deposition of fatty acids in muscle. In addition, the correlation analysis between fatty acids and meat quality found that the content of fatty acids had a greater impact on the meat color and pH value. In summary, the arginine reduced the abundance of hydrogenating bacteria in the rumen and the occurrence of hydrogenation, thus promoting the deposition of beneficial fatty acids in meat for the high meat quality of lambs. These findings can also provide new nutritional intervention strategies for the high quality of mutton.

Keywords: meat; quality control; arginine; fatty acid profile; rumen biohydrogenation; sheep