

DOI:10.11686/cyxb2024414

http://cyxb.magtech.com.cn

任春燕, 郝志云, 邴睿, 等. 开食料添加纤维素酶对羔羊生产性能、器官发育、肌肉脂肪酸组成及血清抗氧化指标的影响. 草业学报, 2025, 34(7): 120—131.

REN Chun-yan, HAO Zhi-yun, BING Rui, *et al.* Effects of adding cellulase to the starter diet on the production performance, organ development, fatty acid composition, and serum antioxidant indices of Hu lambs. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 120—131.

开食料添加纤维素酶对羔羊生产性能、器官发育、肌肉脂肪酸组成及血清抗氧化指标的影响

任春燕¹, 郝志云¹, 邴睿², 霍应栋³, 赵海碧¹, 尹鹏飞¹, 唐德富¹, 蔺淑琴¹, 王继卿^{1*}

(1. 甘肃农业大学动物科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 陇南市动物疫病预防与控制中心, 甘肃 陇南 746023; 3. 会宁县郭城驿镇畜牧兽医站, 甘肃 会宁 730726)

摘要:旨在研究开食料中添加纤维素酶对羔羊生产性能、器官发育、肌肉脂肪酸及血清抗氧化指标的影响。选用初生体重相近的24只15日龄湖羊公羔作为试验动物, 随机分为两组, 对照组和处理组各12只, 分别饲喂未添加纤维素酶和添加0.1%纤维素酶的开食料。0至15日龄羔羊随母哺乳, 15日龄分开后单栏喂养, 并使用代乳粉和开食料喂养, 60日龄断奶, 断奶后继续自由采食开食料至120日龄试验结束。结果表明: 1) 断奶前处理组体重、平均日增重和平均日采食量较对照组显著升高($P<0.05$), 与之相反, 断奶后, 处理组这3项指标均显著降低($P<0.05$)。2) 60日龄的处理组羔羊屠宰率、肺脏指数较对照组显著升高($P<0.05$); 120日龄的对照组羔羊胴体重、屠宰率及心脏指数均显著超过处理组($P<0.05$)。3) 60日龄, 对照组背最长肌丁酸、肉豆蔻酸、棕榈酸均显著高于处理组($P<0.05$), 十五烷酸显著低于处理组($P<0.05$); 120日龄, 对照组二十一烷酸显著高于处理组, 木腊酸则显著低于处理组($P<0.05$)。随日龄的增加, 对照组己酸、辛酸、十一烷酸、肉豆蔻酸、十五烷酸、花生酸、榆树酸及木腊酸显著降低($P<0.05$); 处理组十五烷酸、榆树酸、木腊酸显著降低($P<0.05$), 而棕榈酸显著升高($P<0.05$)。4) 60日龄, 对照组背最长肌豆蔻油酸、棕榈油酸、十七碳烯酸、油酸、 γ -亚麻酸及二十碳五烯酸(EPA)浓度显著高于处理组($P<0.05$); 120日龄, 豆蔻油酸显著高于处理组($P<0.05$); 从60到120日龄, 对照组十七碳烯酸、二十碳六烯酸、花生四烯酸、二十碳五烯酸、二十二碳六烯酸显著降低, 豆蔻油酸显著升高; 处理组单不饱和脂肪酸、豆蔻油酸、棕榈油酸、油酸显著升高($P<0.05$), 多不饱和脂肪酸、亚油酸、 α -亚麻酸、二十碳二烯酸、二十碳六烯酸、二十碳三烯酸、花生四烯酸、二十碳五烯酸、二十二碳六烯酸显著降低($P<0.05$)。5) 60日龄, 除去对丙二醛浓度无影响外, 对断奶后抗氧化性能有一定的改善。120日龄时, 处理组除超氧化物歧化酶活性较对照组显著降低外, 其余指标均显著升高($P<0.05$)。综上, 在本试验条件下, 当饲喂添加0.1%纤维素酶开食料能够提高断奶前羔羊生产性能及屠宰率, 对断奶后肌肉脂肪酸的组成及抗氧化性能均有一定的改善。

关键词:纤维素酶; 羔羊; 生产性能; 器官发育; 脂肪酸; 血清抗氧化指标

Effects of adding cellulase to the starter diet on the production performance, organ development, fatty acid composition, and serum antioxidant indices of Hu lambs

REN Chun-yan¹, HAO Zhi-yun¹, BING Rui², HUO Ying-dong³, ZHAO Hai-bi¹, YIN Peng-fei¹, TANG De-fu¹, LIN Shu-qin¹, WANG Ji-qing^{1*}

1. College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Animal Disease

收稿日期: 2024-10-22; 改回日期: 2024-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160800), 公招博士科研启动金(GAU-KYQD-2018-28)和甘肃农业大学学科团队项目(GAU-XKTD-2022-21)资助。

作者简介: 任春燕(1985—), 女, 甘肃天祝人, 讲师, 博士。E-mail: rency@gsau.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wangjq@gsau.edu.cn

Prevention and Control Center, Longnan City, Longnan 746023, China; 3. Animal Husbandry and Veterinary Station of Guochengyi Town, Huining County, Huining 730726, China

Abstract: We investigated the effects adding cellulase to the starter diet on the production performance, organ development, muscle fatty acid content, and serum antioxidant indexes of Hu lambs. Twenty-four 15-day-old male Hu lambs with similar birth weights were divided into two groups: control (12 lambs fed with a starter diet) and treatment (12 lambs fed with a starter diet containing cellulase at 0.1% w/v). The experiment had a randomized group design. The test lambs were lactated with their mothers from 0 to 15 days of age, and then separated at 15 days of age and fed with milk replacer and kibble in a single pen. They were weaned at 60 days of age, and continued to feed freely on kibble after weaning. The experiment ended when the lambs reached 120 days of age. The main results were follows: 1) The body weight, average daily gain, and average daily feed intake of lambs were significantly higher in the treatment group than in the control group ($P < 0.05$) at the pre-weaning stage; but significantly lower in the treatment group than in the control group ($P < 0.05$) post-weaning. 2) At 60 days of age, the slaughter rate and lung index were significantly higher in the treatment group than in the control group ($P < 0.05$). At 120 days of age, the carcass weight and slaughter rate as well as heart indices were significantly higher in the control group than in the treatment group ($P < 0.05$). 3) At 60 days of age, the concentrations of butyric acid, myristic acid, and palmitic acid in the longissimus dorsi muscle were significantly higher in the control group than in the treatment group ($P < 0.05$), whereas the concentration of pentadecanoic acid was significantly lower in the control group than in the treatment group ($P < 0.05$). At 120 days of age, the heneicosanoic acid concentration was significantly higher in the control group than in the treatment group, and the lignoceric acid concentration was significantly lower in the control group than in the treatment group ($P < 0.05$). As lamb age increased, the concentrations of caproic acid, caprylic acid, undecenoic acid, myristic acid, pentadecanoic acid, arachidic acid, elaidic acid, and lignoceric acid significantly decreased in the control group; and those of pentadecanoic acid, elaidic acid, and lignoceric acid significantly decreased and that of palmitic acid significantly increased in the treatment group ($P < 0.05$). 4) At 60 days of age, the concentrations of myristoleic acid, palmitoleic acid, heptadecaenoic acid, oleic acid, γ -linolenic acid, and eicosapentaenoic acid (EPA) in the longissimus dorsi muscle were significantly higher in the control group than in the treatment group ($P < 0.05$). At 120 days of age, the concentration of myristoleic acid was significantly higher in the control group than in the treatment group ($P < 0.05$). From 60 to 120 days of age, in the control group, the concentrations of heptadecaenoic acid, eicosaheptaenoic acid, arachidonic acid, EPA and docosaheptaenoic acid (DHA) significantly decreased, and the concentration of myristoleic acid significantly increased; in the treatment group, the concentrations of monounsaturated fatty acids, myristoleic acid, palmitoleic acid, and oleic acid significantly increased ($P < 0.05$), and the concentrations of polyunsaturated fatty acids, linoleic acid, α -linolenic acid, eicosadienoic acid, eicosaheptaenoic acid, epoxyeicosatrienoic acids, arachidonic acid, EPA and DHA significantly decreased ($P < 0.05$). 5) At 60 days of age, all indexes were significantly higher ($P < 0.05$) in the control group than in the treatment group, except for the malondialdehyde concentration, which showed no significant difference. At 120 days of age, the values of all indexes were significantly higher in the treatment group than in the control group ($P < 0.05$), except for the superoxide dismutase concentration, which was significantly lower ($P < 0.05$). These results show that the addition of 0.1% cellulase to the starter diet improved the digestion, feed utilization, and slaughter performance of Hu lambs; it promoted fatty acid accumulation and affected fatty acid composition in muscle, which were beneficial to health pre-weaning, and improved antioxidant indices post-weaning.

Key words: cellulase; lamb; production performance; organ development; fatty acids; serum antioxidant index

由于反刍动物消化器官结构的特殊性,确保日粮中含有一定量含纤维的碳水化合物相当重要。反刍动物瘤胃微生物通过自然发酵产生的内源性纤维素酶数量有限,且产生酶的类型以及不同酶的比例都会影响开食料吸收,因此纤维消化已成为反刍动物饲料利用和生长性能的限制因素^[1]。补充外源性纤维素酶不仅可以有效补偿羔羊体内内源性酶的不足,而且还能通过内外源酶的共同作用,高效降解细胞壁,加速营养物质的释放,增强其对营养物质的吸收能力,进而有效促进幼龄反刍动物的生长。多项研究表明,补充外源纤维素酶可以提高饲料中粗纤维的消化率和饲料转化,同时能耗更低、更经济、污染更少,是获得更多可代谢能量和提高反刍动物生长性能的方式之一^[2-4]。利用纤维素酶对绵羊、羊驼、黑山羊的基础日粮进行处理后,绵羊和羊驼的胴体重和净肉重显著增加,同时也成功改善了黑山羊的生长性能、血清生化指标及营养消化率^[5-7]。Zhao等^[2]发现,在湖羊的基础日粮中添加活性为15000 IU·kg⁻¹的纤维素酶,4个月后饲料转化率提高,肠道发育良好。此外,吴爽^[8]的试验也表明经过纤维素处理的荞麦(*Fagopyrum esculentum*)秸秆可显著提升滩羊的血清抗氧化能力。在反刍动物消化机能异常时,外源性纤维素酶的添加可有效改善和调整消化道内微生物结构,使机体微生物区系结构重新达到平衡状态^[9-10]。而关于纤维素酶制剂对羔羊肌肉脂肪酸组成的影响鲜有报道。此外,目前为止在反刍动物生产中有关纤维素酶用量研究大多针对6月龄以后,而对于4月龄以内的羔羊研究尚无报道。

由于羔羊刚出生后,消化系统、免疫系统及内脏器官都处于发育阶段,在其开食料中添加纤维素酶具有一定意义。由此提出假设,在羔羊开食料中添加纤维解酶可以提高羔羊的日增重、促进器官发育、增强机体抗氧化能力,进而改善机体生长健康状况,提高羔羊生长性能。因此,该研究以湖羊羔羊为受试对象,旨在研究在羔羊开食料中添加纤维素酶对羔羊生产性能、器官发育、脂肪酸及血清抗氧化指标的影响,为生产实践提供科学应用纤维素酶的参考依据。

1 材料与方法

本试验于2023年4—8月在甘肃省白银市全盛养殖场完成。试验期105 d。所有涉及动物的程序都遵循甘肃农业大学动物伦理委员会的批准(编号:GSAU-Eth-Ast-2021-008)。

1.1 试验设计

本研究选用24只体重相近[(5.0±0.5) kg]的15日龄湖羊公羔,利用完全随机设计,将试验羔羊分配为2组(对照组和处理组),每组12只,对照组饲喂开食料,处理组饲喂开食料+0.1%纤维素酶(酶活性≥10000 U·g⁻¹、砷≤3.0 mg·kg⁻¹、铅≤10.0 mg·kg⁻¹、磷≤0.5 mg·kg⁻¹)。开食料的配制是将苜蓿(*Medicago sativa*)和燕麦草(*Arrhenatherum elatius*)粉碎(料粒直径为3 mm)后与其他饲料原料混合制粒,一周配料一次。开食料养分和营养水平如表1所示。

表1 开食料营养组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of starter diets (dry matter basis, %)

原料组成 Ingredients	比例 Percentage
玉米 Corn	38.00
豆粕 Soybean meal	22.20
麸皮 Wheat bran	8.00
苜蓿 Alfalfa hay	16.00
石粉 Limestone	1.67
磷酸氢钙 CaHPO ₄	0.78
食盐 NaCl	0.35
预混料 Premix ¹⁾	1.00
合计 Total	100.00

营养水平 Nutrient levels ²⁾	含量 Content
干物质 Dry matter	92.32
粗蛋白质 Crude protein	17.62
粗灰分 Crude ash	8.43
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	45.22
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	15.96

注: ¹⁾预混料为每kg饲粮提供:维生素A 120000~200000 IU,维生素D₃ 15000~56000 IU,维生素E 400 IU,烟酰胺 300 mg, D-生物素 0.3 mg,铁 15 g,铜 0.5 g,锌 3.0 g,锰 2.4 g,碘 20 mg,硒 10 mg,钙 200 g,磷 20 g。²⁾均为实测值。

Note: ¹⁾The premix provided the following per kg of the diets: V_A 120000—200000 IU, V_{D₃} 15000—56000 IU, V_E 400 IU, niacinamide 300 mg, D-biotin 0.3 mg, iron 15 g, cooper 0.5 g, zinc 3.0 g, manganese 2.4 g, iodine 20 mg, selenium 10 mg, calcium 200 g, phosphorus 20 g. ²⁾All are measured values.

1.2 饲养管理

试验前期对饲养笼子、料槽和饮水桶进行彻底的洗涤及消毒。对试验羔羊进行出生后疫苗接种。试验羔羊初生至15日龄随母哺乳,15日龄开始单独饲养(笼子大小:0.9 m×0.9 m),并饲喂代乳粉(采购自北京精准动物营养研究中心有限公司)和开食料,每次按照羔羊体重的2.0%量进行投喂^[11]。60日龄断奶,断奶后继续自由采食开食料,120日龄试验结束。每天需进行3次代乳粉投喂,分别在上午7点、下午2点和晚上8点进行,56日龄断代乳粉。断代乳粉方法:56~57日龄喂两次(上午7点、晚上8点),58~59日龄喂一次(上午7点),60日龄停喂代乳粉。从15到120日龄,两组羔羊每天喂开食料两次(上午8点,下午4点)。羔羊自由采食及饮水,并且每日确保所提供的料盆内有部分饲料剩余。每天早上饲喂后清理笼子卫生,并定期对笼舍及周围环境进行消毒,确保羊舍干燥、清洁和通风。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 生产性能测定 试验中,应准确记录每只初生羔羊体重,从15日龄开始,每7 d饲喂前对其进行称重并做好记录,进而计算羔羊的平均日增重。同时,每天需记录每只羔羊的开食料投料量和剩料量,以此计算羔羊的平均日采食量。

1.3.2 血清抗氧化指标的测定 于受试羔羊60和120日龄,在其进食前空腹采用颈静脉采血的方式。每只羔羊采集10 mL血液于促凝管内,静置2 h,接着离心机3000 r·min⁻¹离心20 min,取出清液,分装后存放于-20℃冰箱,并在隔日送至北京华英生物技术研究进行血清抗氧化指标的检测,其中包括总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)、总超氧化物歧化酶(total superoxide dismutase, T-SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性及丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量。

1.3.3 屠宰性能的测定 受试羔羊分别在60和120日龄,每组选用6只相近体重的羔羊,空腹活体称重,然后颈静脉放血屠宰,对胴体重量、屠宰率、头部重量、蹄部重量、心脏、肝脏、脾脏、肺部和肾脏的质量进行测定。采用蒋红琴^[12]的方法测定眼肌面积。

1.3.4 背最长肌的采集及脂肪酸的测定 受试羔羊屠宰后,每只羔羊取背最长肌3份于自封袋,编号记录,于-20℃储藏,待测。测定肌肉脂肪酸的具体方法可以参考王海波等^[13]提出的方案。

1.4 数据分析

使用Excel 2018及SPSS 26对测试数据进行处理,采用双因素分析处理脂肪酸数据,采用T检验分析其他数据。试验结果采用平均值±标准差进行表示,当 $P<0.05$ 时被认为差异显著,当 $P<0.01$ 时被认为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 开食料添加纤维素酶对羔羊生产性能的影响

由表2数据可知,在42、56和60日龄,与对照组相比,处理组羔羊体重显著提高($P<0.05$);断奶后处理组各日龄体重均显著低于对照组($P<0.05$)。平均日增重在断奶前(15~60 d)处理组显著高于对照组($P<0.05$);断奶后平均日增重除84~98 d差异不显著($P>0.05$)外,其他各阶段对照组均显著高于处理组($P<0.05$)。平均日采食量除15~28 d和84~98 d差异不显著($P>0.05$)外,其他各阶段对照组均显著高于处理组($P<0.05$)。

2.2 开食料添加纤维素酶对羔羊器官发育的影响

由表3可知,60日龄,试验组羔羊屠宰率和肺脏指数显著高于对照组($P<0.05$)。120日龄,对照组胴体重、屠宰率、毛皮重和心脏指数均显著超过处理组($P<0.05$),其他测量指标均无显著差异($P>0.05$)。

2.3 开食料添加纤维素酶对羔羊背最长肌饱和脂肪酸的影响

由表4可知,60日龄,对照组背最长肌丁酸、肉豆蔻酸、棕榈酸均显著高于处理组($P<0.05$),十五烷酸显著低于处理组($P<0.05$);120日龄,对照组二十一烷酸显著高于处理组,木腊酸则显著低于处理组($P<0.05$)。随日龄的增加,对照组己酸、辛酸、十一烷酸、肉豆蔻酸、十五烷酸、花生酸、榆树酸及木腊酸显著降低($P<0.05$);处理组十五烷酸、榆树酸、木腊酸显著降低($P<0.05$),而棕榈酸显著升高($P<0.05$)。

表 2 开食料添加纤维素酶对羔羊生产性能的影响

Table 2 Effect of cellulase addition to starters on the production performance of lambs

项目 Item	日龄 Age (d)	处理 Treatment		P 值 P value
		对照组 Control	处理组 Treatment	
体重 Body weight (BW, kg)	初始重 Initial weight	5.32±0.06	5.38±0.08	0.28
	15	5.61±0.10	5.70±0.11	0.39
	28	6.78±0.40	7.18±0.43	0.52
	42	7.98±0.23b	9.08±0.38a	0.04
	56	10.02±0.17b	11.24±0.36a	0.03
	60	10.48±0.72b	11.49±0.59a	0.03
	70	15.42±0.37a	14.63±0.64b	0.04
	84	20.15±0.60a	18.53±0.69b	0.04
	98	24.37±0.71a	22.05±0.55b	0.01
	112	28.73±0.78a	25.41±0.50b	0.01
	120	30.12±0.80a	28.66±1.20b	0.01
平均日增重 Average daily gain (ADG, g·d ⁻¹)	15~28	85.94±3.89b	106.73±3.51a	0.03
	28~42	90.71±2.64b	136.39±8.46a	0.00
	42~60	148.21±3.19b	159.77±3.94a	0.05
	断奶前 Pre-weaning 15~60	106.52±2.09b	124.96±3.13a	0.01
	60~70	382.29±16.01a	252.14±21.72b	0.02
	70~84	337.84±15.64a	277.71±27.07b	0.02
	84~98	305.71±23.84	254.52±20.32	0.51
	98~112	331.90±17.56a	241.67±25.18b	0.02
	112~120	338.31±15.81a	288.12±24.14b	0.01
	断奶后 Post-weaning 60~120	336.21±15.06a	256.79±10.60b	0.01
平均日采食量 Average daily feed intake (ADFI, g·d ⁻¹)	15~28	172.79±12.88	152.50±18.47	0.38
	28~42	293.57±15.32a	232.07±6.62b	0.00
	42~60	565.24±29.45a	418.69±28.59b	0.03
	断奶前 Pre-weaning 15~60	319.49±18.79a	237.97±10.78b	0.00
	60~70	1025.48±20.95a	892.12±45.54b	0.02
	70~84	1129.29±36.17a	1015.43±28.17b	0.04
	84~98	1274.29±69.70	1274.50±89.03	0.10
	98~112	1616.29±55.42a	1359.76±33.75b	0.00
	112~120	1817.92±82.82a	1439.17±43.53b	0.01
	断奶后 Post-weaning 60~120	1225.18±24.09a	1104.36±42.74b	0.03

注：同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),无字母表示差异不显著。下同。

Note: In the same row, the different lowercase letters mean significant differences ($P<0.05$), no letter means no significant difference. The same below.

2.4 开食料添加纤维素酶对羔羊背最长肌不饱和脂肪酸的影响

由表 5 可知,60 日龄,对照组背最长肌豆蔻油酸、棕榈油酸、十七碳烯酸、油酸、 γ -亚麻酸及二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)浓度显著高于处理组($P<0.05$);120 日龄,豆蔻油酸显著高于处理组($P<0.05$)。从 60 到 120 日龄,对照组十七碳烯酸、二十碳六烯酸、花生四烯酸、EPA、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid,

表 3 开食料添加纤维素酶对羔羊器官发育的影响

Table 3 Effect of cellulase addition to starters on the organ development of lambs

项目 Item	60 日龄 60 days old (60 d)		120 日龄 120 days old (120 d)	
	对照组 Control	处理组 Treatment	对照组 Control	处理组 Treatment
宰前活重 Live weight (kg)	10.48±0.72	11.49±0.59	30.12±0.80	28.66±1.20
胴体重 Carcass weight (kg)	4.46±0.47	4.63±0.32	14.04±0.19a	12.64±0.49b
屠宰率 Dressing percentage (%)	39.22±0.52b	41.34±0.43a	48.39±0.51a	46.59±0.42b
头重 Head weight (kg)	0.84±0.05	0.81±0.02	1.80±0.03	1.77±0.03
蹄重 Hoof weight (kg)	0.37±0.02	0.41±0.02	0.76±0.02	0.75±0.02
毛皮重 Fur weight (kg)	0.96±0.07	0.96±0.08	3.44±0.16a	2.86±0.15b
心脏指数 Heart index (%)	0.54±0.02	0.54±0.01	0.50±0.01a	0.44±0.02b
肝脏指数 Liver index (%)	2.45±0.14	2.73±0.16	2.59±0.07	2.37±0.02
脾脏指数 Spleen index (%)	0.15±0.01	0.17±0.02	0.15±0.01	0.15±0.01
肺脏指数 Lung index (%)	1.91±0.11b	2.62±0.18a	1.52±0.15	1.47±0.10
肾脏指数 Kidney index (%)	0.57±0.03	0.60±0.04	0.34±0.32	0.38±0.03
眼肌面积 Loin eye area (cm ²)	7.60±0.41	7.15±0.51	14.13±0.33	12.10±0.82

表 4 开食料添加纤维素酶对羔羊背最长肌饱和脂肪酸的影响

Table 4 Effects of cellulase addition to starters on saturated fatty acids of the longest muscle in lamb (g·100 g⁻¹ total fatty acids)

项目 Items	60 日龄 60 days old (60 d)		120 日龄 120 days old (120 d)		日龄 Day (D)		分组 Group (G)		D×G	
	对照组 Control	处理组 Treatment	对照组 Control	处理组 Treatment	F	P	F	P	F	P
饱和脂肪酸 SFA	45.18±7.37	38.67±2.71	40.56±1.83	42.07±1.19	0.056	0.820	0.931	0.367	2.385	0.166
丁酸 C4:0	0.70±0.02Aa	0.61±0.03B	0.38±0.13b	0.40±0.11	21.947	0.002	0.412	0.541	0.924	0.368
己酸 C6:0	0.27±0.00a	0.20±0.06	0.17±0.03b	0.14±0.06	10.025	0.016	3.614	0.099	0.829	0.393
辛酸 C8:0	0.15±0.02a	0.13±0.01	0.06±0.01b	0.10±0.04	19.100	0.003	0.586	0.469	5.069	0.059
癸酸 C10:0	0.11±0.05	0.04±0.00	0.10±0.04	0.11±0.03	1.824	0.219	1.344	0.284	2.853	0.135
十一烷酸 C11:0	0.10±0.01a	0.09±0.02	0.04±0.02b	0.06±0.03	11.565	0.011	0.004	0.949	1.568	0.251
月桂酸 C12:0	0.16±0.11	0.08±0.01	0.06±0.01	0.05±0.02	2.886	0.133	1.582	0.249	0.929	0.367
十三烷酸 C13:0	0.09±0.08	0.07±0.04	0.04±0.00	0.04±0.01	2.278	0.175	0.131	0.728	0.163	0.698
肉豆蔻酸 C14:0	2.65±0.02Aa	1.20±0.35B	1.53±0.47b	1.57±0.36	3.222	0.116	11.204	0.012	12.625	0.009
十五烷酸 C15:0	4.54±0.03Ba	4.69±0.04Aa	1.90±0.02b	2.63±0.86b	69.803	0.000	2.471	0.160	1.041	0.342
棕榈酸 C16:0	21.63±0.77A	15.50±0.97Bb	21.07±1.13	21.77±0.99a	22.987	0.002	20.692	0.003	32.798	0.001
十七烷酸 C17:0	1.93±0.53	1.01±0.00	1.41±0.25	1.12±0.12	1.129	0.323	9.593	0.017	2.677	0.146
硬脂酸 C18:0	15.49±2.97	13.43±1.49	12.29±1.15	13.27±0.80	2.226	0.179	0.229	0.647	1.815	0.220
花生酸 C20:0	0.11±0.01a	0.10±0.03	0.05±0.01b	0.07±0.01	27.729	0.001	0.109	0.751	2.124	0.188
二十一烷酸 C21:0	0.14±0.10	0.10±0.02	0.13±0.02A	0.06±0.03B	0.655	0.445	2.437	0.162	0.074	0.794
榆树酸 C22:0	0.93±0.12a	1.07±0.08a	0.42±0.07b	0.57±0.08b	86.505	0.000	7.096	0.032	0.016	0.902
二十三烷酸 C23:0	0.05±0.02	0.05±0.01	0.04±0.00	0.04±0.01	2.009	0.199	0.001	0.980	0.001	0.980
木蜡酸 C24:0	0.16±0.01a	0.25±0.08a	0.05±0.00Bb	0.07±0.01Ab	60.972	0.000	10.129	0.015	3.721	0.095

注：大写字母表示同一日龄不同分组间差异显著，小写字母表示同一分组不同日龄间差异显著。下同。

Note: Uppercase letters indicate significant differences between different groups of the same day age, and lowercase letters indicate significant differences between different days of the same group. The same below. SFA: Saturated fatty acid.

DHA)显著降低,豆蔻油酸显著升高;处理组单不饱和脂肪酸、豆蔻油酸、棕榈油酸、油酸显著升高($P<0.05$),十五碳烯酸、多不饱和脂肪酸、亚油酸、 α -亚麻酸、二十碳二烯酸、二十碳六烯酸、二十碳三烯酸、花生四烯酸、EPA、DHA显著降低($P<0.05$)。

表5 开食料纤维素酶对羔羊背最长肌不饱和脂肪酸的影响

Table 5 Effects of cellulase addition to starters on unsaturated fatty acids of the longest muscle in lamb ($\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ total fatty acids)

项目 Items	60日龄 60 days old (60 d)		120日龄 120 days old (120 d)		日龄 Day (D)		分组 Group (G)		D×G	
	对照组	处理组	对照组	处理组	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	Control	Treatment	Control	Treatment						
单不饱和脂肪酸 MUFA	38.54±3.42	31.92±1.28b	40.51±5.27	41.17±1.74a	6.782	0.035	1.909	0.210	2.861	0.135
豆蔻油酸 C14:1	0.14±0.01Ab	0.04±0.00Bb	0.31±0.04Aa	0.07±0.01Ba	52.767	0.000	155.732	0.000	26.190	0.001
十五碳烯酸 C15:1	0.14±0.07	0.16±0.01a	0.11±0.01	0.12±0.02b	2.559	0.154	0.476	0.512	0.052	0.827
棕榈油酸 C16:1	1.47±0.11A	1.04±0.01Bb	1.45±0.36	1.49±0.18a	2.550	0.154	2.027	0.197	3.048	0.124
十七碳烯酸 C17:1	1.45±0.06Aa	0.77±0.06B	1.06±0.12b	0.88±0.17	3.807	0.092	36.633	0.001	11.812	0.011
反式油酸 C18:1n9t	2.93±0.78	2.79±0.92	2.47±0.20	2.25±0.34	1.941	0.206	0.257	0.628	0.013	0.914
油酸 C18:1n9c	29.98±1.61A	25.56±0.67Bb	33.47±4.05	35.55±1.90a	18.606	0.004	0.563	0.478	4.314	0.076
二十碳烯酸 C20:1	0.23±0.07	0.15±0.06	0.13±0.08	0.09±0.01	4.450	0.073	2.586	0.152	0.344	0.576
芥酸 C22:1n9	0.15±0.08	0.11±0.04	0.07±0.01	0.08±0.02	2.760	0.141	0.244	0.636	0.827	0.393
二十四碳烯酸 C24:1	0.91±0.48	1.14±0.08a	0.62±0.22	0.57±0.09b	6.043	0.044	0.273	0.617	0.622	0.456
多不饱和脂肪酸 PUFA	26.06±11.86	29.41±1.43a	15.16±0.57	16.76±2.51b	8.719	0.021	0.385	0.554	0.049	0.832
反式亚油酸 C18:2n6t	0.25±0.06	0.24±0.03	0.16±0.00	0.19±0.03	8.420	0.023	0.172	0.691	0.826	0.394
亚油酸 C18:2n6c	16.31±7.45	18.15±1.08a	12.14±3.85	10.50±1.30b	4.490	0.072	0.001	0.972	0.388	0.553
γ -亚麻酸 C18:3n6	0.28±0.03A	0.19±0.03B	0.20±0.08	0.14±0.01	5.348	0.054	7.090	0.032	0.499	0.503
α -亚麻酸 C18:3n3	1.09±0.26	1.07±0.05a	0.74±0.19	0.59±0.06b	14.587	0.007	0.601	0.464	0.397	0.549
共轭亚油酸 CLA	0.31±0.19	0.29±0.14	0.20±0.08	0.25±0.06	0.876	0.381	0.069	0.800	0.164	0.698
二十碳二烯酸 C20:2	0.23±0.10	0.19±0.02a	0.20±0.17	0.10±0.02b	0.841	0.390	1.105	0.328	0.145	0.714
二十碳六烯酸 C20:3n6	0.68±0.07a	0.65±0.01a	0.27±0.02b	0.35±0.12b	57.765	0.000	0.390	0.552	1.170	0.315
二十碳三烯酸 C20:3n3	0.09±0.04	0.14±0.00a	0.07±0.02	0.06±0.02b	10.776	0.013	1.655	0.239	4.364	0.075
花生四烯酸 C20:4n6	8.33±1.45a	7.78±0.02a	3.39±0.57b	4.29±1.12b	44.935	0.000	0.080	0.785	1.332	0.286
二十二碳二烯酸 C22:2	0.04±0.01	0.05±0.02	0.02±0.01	0.02±0.01	14.568	0.007	0.922	0.369	0.035	0.857
EPA C20:5n3	0.48±0.03Aa	0.35±0.01Ba	0.23±0.13b	0.18±0.07b	18.390	0.004	2.978	0.128	0.645	0.448
DHA C22:6n3	0.23±0.02a	0.21±0.00a	0.09±0.03b	0.08±0.02b	80.197	0.000	0.980	0.355	0.086	0.778

MUFA: Monounsaturated fatty acid; PUFA: Polyunsaturated fatty acids; CLA: Conjugated linoleic acid.

2.5 开食料添加纤维素酶对羔羊血清抗氧化指标的影响

由表6可知,60日龄,对照组血液 T-AOC、GSH-Px、SOD 和 CAT 活性显著高于处理组($P<0.05$)。120日龄,处理组血液 T-AOC、MDA 含量和 GSH-Px、CAT 活性显著高于对照组($P<0.05$),SOD 活性低于对照组($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 开食料添加纤维素酶对羔羊生产性能的影响

在本研究中,羔羊60日龄断奶,断奶前纤维素酶对羔羊 BW 和 ADG 效果显著,在这一阶段,外源纤维素酶的

表 6 开食料添加纤维素酶对羔羊血清抗氧化指标的影响

Table 6 Effects of cellulase addition to starters on serum biochemical indices in lambs

项目 Item	60 日龄 60 days old (60 d)		120 日龄 120 days old (120 d)	
	对照组 Control	处理组 Treatment	对照组 Control	处理组 Treatment
总抗氧化能力 Total antioxidant capacity (T-AOC, U·mL ⁻¹)	8.71±0.22a	7.07±0.12b	6.89±1.07b	9.63±0.35a
谷胱甘肽过氧化物酶 Glutathione peroxidase (GSH-Px, U·mL ⁻¹)	145.59±3.81a	114.74±3.95b	59.62±1.53b	94.04±1.40a
超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase (SOD, U·mL ⁻¹)	82.65±1.76a	64.20±0.76b	4.25±0.23a	2.15±0.22b
丙二醛 Malondialdehyde (MDA, nmol·mL ⁻¹)	4.41±0.30	5.20±0.19	135.05±2.19b	200.29±3.50a
过氧化氢酶 Catalase (CAT, U·mL ⁻¹)	46.83±1.17a	33.12±3.07b	33.84±0.86b	49.77±0.70a

补充对开食料的消化吸收发挥很大作用,可能是由于纤维素酶作用于开食料中的苜蓿和燕麦干草,使植物细胞壁遭到破坏,利于胞内营养物质的释放,导致纤维素酶对开食料中的纤维素降解效率提高,促进了干物质的消化率,从而有利于断奶前羔羊 ADG 和饲料转化率的提高^[14]。断奶之后,对照组 BW 和 ADG 均显著高于处理组。一方面,羔羊的胃肠道功能随着成长逐渐成熟,内源性纤维素酶的分泌量也在增加,同时纤维素酶对成年羊的作用效果有所减弱;另一方面,纤维素酶的添加量同样会影响羔羊的 BW 和 ADG。Atrian 等^[15]在饲喂奶牛的苜蓿干草中分别加入不同量(9.50、14.25、19.00 mL)的纤维素酶裂解液,日增重和饲料转化率在纤维素酶裂解液为 14.25 mL 时效果最好,添加量为 19.00 mL 时,结果则相反。邓玉英等^[16]研究发现,当纤维素酶添加量为 0.5% 时,黑山羊日增重和饲料转化率均高于未添加纤维素酶组,当添加量为 1% 时,饲喂效果下降。由此说明,纤维素酶的活性、添加量是否适宜对 BW、ADG 及饲料转化率有很大影响。

研究认为,在饲料中添加外源纤维素酶可提高采食量^[17-18],也有研究认为其对采食量无显著影响,如 Zulkarnain 等^[19]在肉鸡基础饲料中补充纤维素酶不会影响采食量,而日增重和饲料转化率却显著增加。与以上结果不同的是,本研究中,饲喂纤维素酶组 ADFI 显著低于未添加纤维素酶组。该结果与 Khademi 等^[20]向犊牛开食料添加纤维素酶结果相一致。导致 ADFI 降低的原因可能是纤维素酶的添加方式和添加量影响了酶在机体的活性^[21]。由于纤维素酶的作用使苜蓿和燕麦草纤维结构发生变化,影响了羔羊瘤胃微生物的菌群组成及酶活性,造成 ADFI 下降。由于酶预处理提高了饲料的消化率,羔羊通过提高能量利用率来减少饲料消耗^[21]。在该研究中,较低的开食料采食量被较高的消化率和代谢能所补偿,从而获得了相似或更高的生长性能。综上得出,纤维素酶的补充量应该随着羔羊日龄的变化及时做出科学调整,以达到最佳的饲喂效果。

3.2 开食料添加纤维素酶对羔羊器官发育的影响

相关研究表明,添加酶制剂后,绵羊的活体重和宰后的胴体重均出现了显著升高^[22]。Mandey 等^[23]在肉鸡日粮中分别添加瘤胃内容物(10%、20%)和纤维素酶(0、0.5 g·kg⁻¹),发现纤维素酶+瘤胃内容物添加组粗纤维利用率和胴体产量显著高于其他组。毛倩倩等^[24]研究揭示,在高纤维日粮中配合不同浓度的果胶酶并叠加纤维素酶(40000 U·kg⁻¹)的应用,可提高屠宰性能。与以上结果不同,黄正旺等^[25]在研究不同酶制剂对肉鹅的饲喂效果中发现,添加纤维素酶对扬州鹅的日增重具有积极的作用,但对屠宰性能的影响不显著。在本研究中,60 日龄时,添加纤维素酶组的屠宰率显著高于对照组,但在宰前活重和胴体重方面并未出现显著区别;然而,120 日龄时,对照组胴体重和屠宰率均明显高于试验组。本试验中,断奶前羔羊处理组肺脏指数显著高于对照组,但在 120 日龄,未饲喂组胴体重、屠宰率、心和肝相对重量显著高于纤维素酶组,这一结果与对照组羔羊断奶后平均日增重和采食量显著高于饲喂纤维素酶组相一致。这表明,羔羊开食料中纤维素酶的添加量是否适宜还需要继续深入研究。此外,眼肌面积被认为是评估羊胴体质量的关键指标,与胴体质量呈正相关。本研究中开食料添加纤维素酶对眼肌面积无显著影响,与前人研究结果相一致^[26]。

3.3 添加纤维素酶对羔羊背最长肌脂肪酸的影响

肌肉脂肪酸的沉积过程较为复杂,受多种因素共同作用^[27-28]。肌肉脂肪酸的变化可能源于纤维素酶作用于

饲料,进而改变了其在胃肠道的消化特性。研究指出,体外发酵类型受纤维类型的显著影响,发酵液中脂肪酸及共轭亚油酸(conjugated linoleic acid, CLA)的组成亦受其影响^[29]。酶制剂的补充使饲喂苜蓿、小麦(*Triticum aestivum*)及精料的羔羊体外产气量提高,pH下降,瘤胃挥发性脂肪酸浓度升高^[30]。尹鹏飞等^[31]研究显示,纤维素酶的添加显著提高了60日龄羔羊瘤胃挥发性脂肪酸、乙酸、丙酸及丁酸浓度,促进了胃肠道菌群生长和活性,改变了微生物利用底物的代谢途径^[32],加速了糖类等的降解,促进了瘤胃挥发性脂肪酸(volatile fatty acid, VFA)、乙酸、丙酸等的水平。因此,消化道菌群结构的改变是影响肌肉脂肪酸组成的重要因素。

肌肉中常见的脂肪酸种类主要包括多不饱和和单不饱和脂肪酸,其组成和含量对肉的营养价值、口感和健康都有不同程度的影响^[33-34]。本试验测试的羔羊背最长肌中发现了38种脂肪酸,其中油酸水平最高,棕榈酸次之,硬脂酸含量则最低。短链脂肪酸和硬脂酸对肉品气味有影响,而油酸与棕榈酸则影响肉品风味^[35]。关于纤维素酶的添加是否对肉脂肪酸产生影响,研究结果不一。刘凯等^[36]研究认为添加纤维素酶不会影响羊肉的饱和脂肪酸含量。Sudibya等^[37]向印尼土鸡补充1%纤维素酶,发现对肉的脂肪酸含量无显著影响。与上述研究结果不同,本研究中,纤维素酶添加组60和120日龄时棕榈酸含量显著降低,120日龄时,油酸含量亦显著降低,表明添加纤维素酶对早期肌肉口感和质地有一定影响。研究指出,血液中的胆固醇水平取决于饮食中的脂肪酸组成,长链饱和脂肪酸会增加血液中的胆固醇水平^[38],但并非所有饱和脂肪酸均具有此效应。月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸等化合物会增加血液胆固醇浓度,而硬脂酸则未表现出此效应。刘凯等^[36]用纤维素复合酶饲喂羔羊,发现肌肉中葵酸、月桂酸、肉豆蔻酸水平增加,而硬脂酸和花生酸浓度降低,认为酶的添加促使肌肉产生了对健康不利的脂肪酸组成。与上述研究不同,本研究结果显示,添加纤维素酶组降低了60日龄背最长肌肉豆蔻酸、棕榈酸水平,据前述观点推论,在该试验环境下,补充纤维素酶可对早期羔羊肌肉所含有的脂肪酸成分产生有益于人体健康的影响。

与120日龄相比,60日龄两组脂肪酸含量变化明显,这表明纤维素酶对60日龄前羔羊肌肉脂肪酸的影响较大,间接证明了纤维素酶在幼龄羔羊消化道发育中发挥了重要作用,补充了内源酶的不足,通过调节消化道微生物的活性,利用氢化作用影响脂肪代谢,从而改变肌肉中脂肪酸的组成^[36]。

3.4 添加纤维素酶对羔羊血液抗氧化指标的影响

不同的抗氧化酶在机体抗氧化过程中发挥着不同的作用,T-AOC可对动物机体的抗氧化活性进行全方位、多角度的评估。SOD和GSH-Px可通过酶促反应协同破坏体内的自由基、过氧化物和超氧化物,从而发挥抗氧化作用。MDA是由脂质过氧化反应产生的一种代表性物质,其浓度水平与机体的抗氧化能力水平呈反向关系,因此,可以作为评估细胞受损程度的重要指标。因此,当动物处于生理状态稳定的情况下,动物体可以通过增加T-AOC、GSH-Px、CAT活性^[39]以及降低MDA含量来减少脂质过氧化造成的损害^[40]。在一项研究中,将荞麦秸秆作为饲料,先经过含两种不同浓度的纤维素酶处理后,再喂养给滩羊,结果显示,在60日龄时,两组的MDA含量均低于对照组,这证实了纤维素酶的使用对脂质过氧化具有抑制作用,从而减少了对生物体的损害^[8]。研究发现,在日粮中添加复合酶(含4000 U·g⁻¹纤维素酶)可显著降低仔猪血清中的MDA含量和T-SOD活性^[41],提高GSH-Px活性。本研究中,致使60和120日龄血液T-AOC、GSH-Px和CAT活性出现不同结果的原因可能是断奶前羔羊主要以代乳粉为能量来源,加之试验组采食开食料的量低于处理组,相应苜蓿干草和纤维素酶摄入量降低,苜蓿干草含有多酚和类黄酮等活性物质,对机体的抗氧化性能有一定作用^[42],因此二者可能共同作用,引起血液T-AOC、GSH-Px和CAT活性相应降低;断奶后,羔羊食物以开食料为主,相应羔羊采食的苜蓿干草增多,与此同时,羔羊的胃肠消化系统也逐渐趋于健全,因此外源性纤维素酶也发挥了更大的作用。综上,在初生羔羊饲料中添加纤维素酶利于羔羊断奶后的抗氧化性能。

4 结论

在本试验条件下,羔羊饲喂添加0.1%纤维素酶开食料能够提高断奶前羔羊对饲料的消化利用及屠宰率,促

使肌肉形成利于机体健康的脂肪酸组成;断奶后羔羊生产性能降低,但抗氧化性能提高,因此针对不同日龄羔羊纤维素酶的适宜添加量还需进一步研究。

参考文献 References:

- [1] Titi H H, Tabbaa M J. Efficacy of exogenous cellulase on digestibility in lambs and growth of dairy calves. *Livestock Production Science*, 2004, 87: 207—214.
- [2] Zhao M D, Di L Z, Tang Z Y, *et al.* Effect of tannins and cellulase on growth performance, nutrients digestibility, blood profiles, intestinal morphology and carcass characteristics in Hu sheep. *Animal Bioscience*, 2019, 32(10): 1540—1547.
- [3] Wu S, Zhou Y X, Jia R, *et al.* Effects of cellulase treatment of buckwheat straw on fiber structure and meat quality of Tan sheep. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1): 170—180.
吴爽, 周玉香, 贾柔, 等. 纤维素酶处理荞麦秸秆对其纤维结构和滩羊肉品质的影响. *草业学报*, 2021, 30(1): 170—180.
- [4] Lilleho J H, Liu Y, Calsamigla S, *et al.* Phytochemicals as antibiotic alternatives to promote growth and enhance host health. *Veterinary Research*, 2018, 49(1): 76.
- [5] Wu S, Zhou Y X, Jia R, *et al.* Effects of cellulose treatment of buckwheat straw on production performance of barn feeding Tan sheep and its economic benefit. *Pratacultural Science*, 2020, 37(12): 2541—2549.
吴爽, 周玉香, 贾柔, 等. 纤维素酶处理荞麦秸秆对舍饲滩羊生产性能及经济效益的影响. *草业科学*, 2020, 37(12): 2541—2549.
- [6] Bao X J. Effects of cellulase treated corn straw on growth performance, nutrient apparent digestibility and economic benefit of black goats. *Feed Research*, 2023, 46(13): 22—27.
包晓佳. 纤维素酶处理玉米秸秆对黑山羊生长性能、养分表现消化率 and 经济效益的影响. *饲料研究*, 2023, 46(13): 22—27.
- [7] Jozefiak D, Komosa M, Makowiak P, *et al.* Exogenous fibrolytic enzymes improve carbohydrate digestion in exercising horses. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 2020, 29(1): 35—45.
- [8] Wu S. Effects of cellulose treatment of buckwheat straw on fiber structure and production performance and meat quality of Tan sheep. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
吴爽. 纤维素酶处理荞麦秸秆对其纤维结构以及滩羊生产性能和肉品质的影响. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [9] Liu H, Zhu A N, Meng Y, *et al.* Research progress of cellulase on livestock and poultry production. *Feed Research*, 2022, 45(16): 148—153.
刘欢, 朱安南, 孟勇, 等. 纤维素酶在畜禽生产中的研究进展. *饲料研究*, 2022, 45(16): 148—153.
- [10] Wang Z Z, Shang Y A. Effect analysis of fiber—cellulose composite enzyme on digestibility of dairy cattle. *Animal Breeding and Feed*, 2008(5): 61—62.
王照忠, 尚有安. 纤维素复合酶对奶牛消化率影响的效果分析. *养殖与饲料*, 2008(5): 61—62.
- [11] Duan P W, Liu T, Li Y Z, *et al.* Effects of different starters with different neutral detergent fiber sources on growth performance and gastrointestinal tract development of Hu lambs. *Pratacultural Science*, 2020, 37(8): 1608—1619.
段鹏伟, 刘婷, 李彦珍, 等. 不同 NDF 来源开食料对湖羊羔羊生产性能和胃肠道发育的影响. *草业科学*, 2020, 37(8): 1608—1619.
- [12] Jiang H Q. Effects of lycopene extract on the meat quality of Bamei lamb and its antioxidant mechanism. Beijing: China Agricultural University, 2015.
蒋红琴. 番茄红素对巴美肉羊肉品质的影响及其抗氧化机理研究. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [13] Wang H B, Zhan J S, Huo J H, *et al.* Effects of dietary rutin supplementation on serum immune and antioxidant indices and muscle composition of Hu sheep. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(4): 2504—2513.
王海波, 占今舜, 霍俊宏, 等. 饲料添加芦丁对湖羊血清免疫和抗氧化指标以及肌肉成分的影响. *动物营养学报*, 2022, 34(4): 2504—2513.
- [14] Xin Z X. Study on the effect of cellulose complex enzyme treatment on feeding coarse feed stock to ruminants. Xining: Qinghai University, 2007.
辛总秀. 纤维素复合酶处理粗饲料饲喂反刍动物的效果研究. 西宁: 青海大学, 2007.
- [15] Atrian P, Habid A S. Effects of fibrolytic enzyme treated alfalfa on performance in Holstein beef cattle. *European Journal of Experimental Biologys*, 2012, 2(1): 270—273.
- [16] Deng Y Y, Huang S J, Jiang M S, *et al.* Effects of cellulase on production performance of weaned lambs. *Modern Agricultural*

- Science and Technology, 2010(15): 355—359.
- 邓玉英, 黄仕佳, 江明生, 等. 纤维素酶对断奶羔羊生产性能的影响. 现代农业科技, 2010(15): 355—359.
- [17] Lopez-Aguirre D, Hernandez-Melendez J, Rojo R, *et al.* Effects of exogenous enzymes and application method on nutrient intake, digestibility and growth performance of Pelibuey lambs. Springer Plus, 2016, 5(1): 1399.
- [18] Abid K, Jjabri J, Ammar H, *et al.* Effect of treating olive cake with fibrolytic enzymes on feed intake, digestibility and performance in growing lambs. Animal Feed Science and Technology, 2020, 261: 114405.
- [19] Zulkarnain D, Zuprizal Z, Wihandoyo, *et al.* Utilization of sago waste with cellulase enzyme fermentation as a local feed for broilers in southeast Sulawesi. International Journal of Poultry Science, 2017, 16(7): 266—273.
- [20] Khademi A R, Hashemzadeh F, Khorvash M, *et al.* Use of exogenous fibrolytic enzymes and probiotic in finely ground starters to improve calf performance. Scientific Reports, 2022, 12(1): 11942.
- [21] Guo C Y. The effects of xylanase and cellulase on growth performance, nutrition digestibility, rumen fermentation and microbial diversity in Heifers. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- 国春艳. 木聚糖酶和纤维素酶对后备奶牛生长代谢、瘤胃发酵及微生物区系的影响. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [22] Feng W X, Chen G S, Tao L, *et al.* Effects of different biological treatments of rice straw on growth performance, slaughter performance and organ development of mutton sheep. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(4): 1392—1400.
- 冯文晓, 陈国顺, 陶莲, 等. 不同生物处理水稻秸秆对肉用绵羊生长性能、屠宰性能及器官发育的影响. 动物营养学报, 2017, 29(4): 1392—1400.
- [23] Mandey J S, Maaruf K, Regar M N, *et al.* Effect of dried rumen content with and without cellulase in diet on carcass quality of broiler chickens. International Journal of Poultry Science, 2015, 14(12): 647—650.
- [24] Mao Q Q, Wang B W, Ge W H, *et al.* Effects of high fiber diet supplemented with pectinase and cellulase on growth performance, slaughter performance and meat quality of Wulong geese. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2013, 25(10): 2394—2402.
- 毛倩倩, 王宝维, 葛文华, 等. 高纤维饲料中添加果胶酶和纤维素酶对五龙鹅生长性能、屠宰性能及肉品质的影响. 动物营养学报, 2013, 25(10): 2394—2402.
- [25] Huang Z W, Wu S Q, Kong L W, *et al.* Effects of different enzyme preparations on growth performance and slaughter performance of Yangzhou geese. China Poultry, 2017, 39(5): 63—65.
- 黄正旺, 吴诗樵, 孔令武, 等. 不同酶制剂对扬州鹅生长性能和屠宰性能的影响. 中国家禽, 2017, 39(5): 63—65.
- [26] Zobell D R, Wiedmerer R D, Olson K C, *et al.* The effect of an exogenous enzyme treatment on production and carcass characteristics of growing steers. Animal Feed Science and Technology, 2015, 35(3): 299—306.
- [27] Scollan N D, Enser M, Gulati S K, *et al.* Effects of including a ruminally protected lipid supplement in the diet on the fatty acid composition of beef muscle. The British Journal of Nutrition, 2003, 90(3): 709—716.
- [28] Nuernbrg K, Fischer A, Nuernberg G, *et al.* Meat quality and fatty acid composition of lipids in muscle and fatty tissue of Skudde lambs fed grass versus concentrate. Small Ruminant Research, 2008, 74: 279—283.
- [29] Li Y L, Meng Q X. Effect of different types of fiber on rumen fermentation and production of conjugated linoleic acids *in vitro*. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(5): 41—45.
- 李艳玲, 孟庆翔. 不同类型纤维对活体外瘤胃发酵和共轭亚油酸形成的影响. 中国农业大学学报, 2006, 11(5): 41—45.
- [30] Luo H L, Zhao H B, Xu Y F, *et al.* Effect of cellulose complex enzymes on rumen fermentation in lambs *in vitro*//Proceedings of the 2006 annual conference of the Chinese Animal Husbandry and Veterinary Medical Association. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2006: 322—327.
- 罗海玲, 赵恒波, 徐永锋, 等. 纤维素复合酶对羔羊体外瘤胃发酵的影响//中国畜牧兽医学会2006学术年会论文集. 北京: 中国农业出版社, 2006: 322—327.
- [31] Yin P F, Wang J Q, Hao Z Y, *et al.* Effects of adding cellulase to starter diets on growth performance rumen fermentation and serum biochemical indices of lamb. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(5): 3170—3182.
- 尹鹏飞, 王继卿, 郝志云, 等. 开食料中添加纤维素酶对羔羊生长性能、瘤胃发酵和血清生化指标的影响. 动物营养学报, 2024, 36(5): 3170—3182.
- [32] Kholif A M, Aziz H A. Influence of feeding cellulytic enzymes on performance, digestibility and ruminal fermentation in goats. Animal Nutrition & Feed Technology, 2014, 14: 121—136.
- [33] Liu D H, Yang Y H, Li X J, *et al.* Application effect of cellulase-preparation enzyme on dairy cows. Feed Research, 2000, 23(5): 29.

- 刘德海, 杨玉华, 李新杰, 等. 纤维素复合酶对奶牛的应用效果. 饲料研究, 2000, 23(5): 29.
- [34] Xu Q X, Cao W H, Luo S G, *et al.* Effects of compound plant extracts on growth performance and fatty acid composition of muscle of goats. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(4): 2146—2157.
- 徐琪翔, 曹文豪, 罗双贵, 等. 复合植物提取物对湘东黑山羊生长性能和肌肉脂肪酸组成的影响. 动物营养学报, 2021, 33(4): 2146—2157.
- [35] Khan M I, Jo C, Tario M R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors—A systematic review. Meat Science, 2015, 110: 278—284.
- [36] Liu K, Luo H L, Zhao H B, *et al.* Effects of cellulase-preparation enzymes on fat metabolism in lambs//Proceedings of the 2007—2008 national conference on sheep production and academic research. Beijing: Chinese Association of Animal Science and Veterinary Medicine, 2008: 240—242.
- 刘凯, 罗海玲, 赵恒波, 等. 纤维素复合酶对羔羊脂肪代谢的影响//2007—2008年全国养羊生产与学术研讨会论文集. 北京: 中国畜牧兽医学会, 2008: 240—242.
- [37] Sudibya, Riyato J. Effects of supplementation of cellulase, carnitine and fish oil on lipids and fatty acid contents of Indonesian native chicken meats. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 250(1), DOI: 10.1088/1755-1315/250/1/012079.
- [38] Banskalieva V, Sahlu T, Goetsch A L. Fatty acid composition of goat muscles and fat depots: a review. Small Ruminant Research, 2000, 37(3): 255—268.
- [39] Finkel T, Holbrook N J. Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing. Nature, 2000, 408(6809): 239—247.
- [40] Goliomytis M, Tsourekis D, Simitzis P E, *et al.* The effects of quercetin dietary supplementation on broiler growth performance, meat quality, and oxidative stability. Poultry Science, 2014, 93(8): 1957—1962.
- [41] Hou L, Zhang Q, Deng K W. Effects of complex enzyme preparation on growth performance, serum antioxidant index and immune index of piglets. China Feed, 2023, 1(10): 50—53.
- 侯磊, 张强, 邓凯文. 复合酶制剂对仔猪生长性能、血清氧化指标和免疫指标的影响. 中国饲料, 2023, 1(10): 50—53.
- [42] Chen J H, Sun Y, Wang Y H, *et al.* Effect of alfalfa meal on lipid metabolism and antioxidation of meat rabbits. China Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2013, 40(10): 101—105.
- 陈继红, 孙宇, 王彦华, 等. 苜蓿草粉对肉兔脂质代谢和抗氧化性能的影响. 中国畜牧兽医, 2013, 40(10): 101—105.