DOI:10.11686/cyxb2025497 http://cyxb.magtech.com.cn
陈妮，申洁，石多文，等. 日粮添加不同油脂对羔羊屠宰性能、血液参数及瘤胃挥发性脂肪酸的影响. 草业学报，2026，35(12)：139－149.
CHEN Ni, SHEN Jie, SHI Duo-wen, *et al*. The effects of dietary supplementation with different oils on growth rate, slaughter performance, blood parameters and rumen volatile fatty acid levels in female Hu lambs. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(12): 139－149.

日粮添加不同油脂对羔羊屠宰性能、血液参数及瘤胃挥发性脂肪酸的影响

陈妮[1]，申洁[1]，石多文[2]，沈佳[1]，翁秀秀[1]，李万宏[1*]
（1. 兰州大学草地农业科技学院，草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室，甘肃 兰州 730020；2. 民勤县畜牧技术推广站，甘肃 民勤 733300）

摘要：本试验旨在探究日粮中添加亚麻籽油和葵花籽油对湖羊母羔生长性能、屠宰性能、脏器发育、瘤胃挥发性脂肪酸及血液参数的影响。选取3月龄、体重[(18.86±0.37) kg]且体况接近的健康湖羊母羔30只，随机分为3组，每组10只。对照组(CK)饲喂含4%过瘤胃棕榈酸脂肪粉日粮，试验组分别饲喂添加4%亚麻籽油(LO，富含n-3多不饱和脂肪酸，PUFA)或4%葵花籽油(SO，富含n-6 PUFA)替代棕榈酸脂肪粉的日粮。整个试验期为91 d，其中预试期7 d。结果表明：生长性能方面，LO组57～84 d阶段日增重(0.28 kg·d^{-1})及全期平均日增重(0.26 kg·d^{-1})均显著高于SO组(0.19、0.22 kg·d^{-1})和CK组(0.23、0.25 kg·d^{-1})($P<0.05$)，3组平均日采食量无显著差异($P>0.05$)。体尺与屠宰性能上，3组间均无显著差异($P>0.05$)。脏器发育方面，CK组脾重(0.06 kg)和脾脏指数(0.16%)均显著高于LO(0.05 kg、0.13%)和SO组(0.04 kg、0.13%)($P<0.05$)，LO组肺重(0.63 kg)显著高于CK组(0.56 kg)和SO组(0.54 kg)($P<0.05$)。瘤胃发酵参数方面，LO组和SO组瘤胃液总挥发性脂肪酸(54.56、61.86 mmol·L^{-1})、丙酸(22.84%、25.19%)、丁酸(12.19%、10.72%)浓度均显著高于CK(39.42 mmol·L^{-1}、21.31%、6.11%)($P<0.05$)，而乙酸/丙酸显著低于CK组($P<0.05$)。各组间瘤胃形态学指标无显著差异($P>0.05$)。血液参数方面，LO组血红蛋白(11.76 g·dL^{-1})和红细胞压积(31.06%)显著低于CK(12.58 g·dL^{-1}、36.50%)和SO组(12.51 g·dL^{-1}、35.34%)($P<0.05$)，但所有值均在正常生理范围内。综上所述，日粮中添加4%亚麻籽油与葵花籽油均可影响瘤胃发酵，且亚麻籽油在促进湖羊母羔生长方面效果更佳。

关键词：湖羊母羔；亚麻籽油；葵花籽油；生长性能；屠宰性能；血液参数

The effects of dietary supplementation with different oils on growth rate, slaughter performance, blood parameters and rumen volatile fatty acid levels in female Hu lambs

CHEN Ni[1], SHEN Jie[1], SHI Duo-wen[2], SHEN Jia[1], WENG Xiu-xiu[1], LI Wan-hong[1*]
1. *College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou* 730020, *China*; 2. *Animal Husbandry Technology Promotion Station of Minqin County, Minqin* 733300, *China*

Abstract: This study investigated the effects of dietary supplementation with linseed (*Linum usitatissimum*) or sunflower (*Helianthus annuus*) oil on growth rate, slaughter performance, organ development, rumen volatile fatty acids (VFA), and blood parameters of Hu ewe lambs. Thirty 3-month-old healthy female Hu lambs with a body

收稿日期：2025-12-09；改回日期：2026-01-12
基金项目：甘肃省科技计划(25YFNH005；24CXNH002)和国家肉羊产业技术体系(CARS-38)资助。
作者简介：陈妮(2002－)，女，四川阆中人，在读硕士。E-mail：chenn2025@lzu.edu.cn
*通信作者 Corresponding author. E-mail：limh@lzu.edu.cn

weight of (18.86±0.37) kg and similar body condition were selected and randomly allocated into 3 groups (10 lambs per group). A control group (CK) received a basal diet supplemented with 4% rumen-protected palmitic acid fat powder, while two experimental groups were fed diets with 4% linseed oil (LO, rich in n-3 polyunsaturated fatty acids, PUFA) or 4% sunflower oil (SO, rich in n-6 PUFA) replacing palmitic acid fat powder. The total experimental period lasted 91 days, including a 7-day adaptation period. The average daily gain of the LO group from 57 to 84 days (0.28 kg·d^{-1}) and the average daily gain for the entire experiment period (0.26 kg·d^{-1}) were significantly higher than the corresponding values for the SO group (0.19 kg·d^{-1}and 0.22 kg·d^{-1}, respectively) and the CK group (0.23 kg·d^{-1} and 0.25 kg·d^{-1}, respectively) ($P<0.05$), while there was no significant difference in the average daily feed intake among the three groups ($P>0.05$). In terms of body measurements and slaughter performance, there were no significant differences among the three groups ($P>0.05$). Regarding organ development, the spleen weight (0.06 kg) and relative spleen weight (0.16%) of the CK group were significantly higher ($P<0.05$) than those of the LO group (0.05 kg and 0.13%, respectively) and the SO group (0.04 kg and 0.13%, respectively), and the lung weight (0.63 kg) of the LO group was significantly higher than that of the CK group (0.56 kg) and the SO group (0.54 kg) ($P<0.05$). In terms of rumen fermentation parameters, for the LO and SO groups total rumen volatile fatty acids (54.56 and 61.86 mmol·L^{-1}, respectively), propionic acid (22.84% and 25.19%, respectively), and butyric acid (12.19% and 10.72%, respectively) concentrations in the LO group and the SO group were significantly higher ($P<0.05$) than corresponding values in the CK group (39.42 mmol·L^{-1}, 21.31% and 6.11%, respectively), while the acetate:propionate was significantly lower ($P<0.05$) than that in the CK group. There were no significant differences in rumen morphology indices among the groups ($P>0.05$). In terms of blood parameters, the hemoglobin (11.76 g·dL^{-1}) and hematocrit (31.06%) of the LO group were significantly lower ($P<0.05$) than those of the CK group (12.58 g·dL^{-1} and 36.50%, respectively) and the SO group (12.51 g·dL^{-1} and 35.34%, respectively), but all values were within the normal physiological range for sheep. In conclusion, the supplementation of 4% linseed oil and sunflower oil in the diet both affected rumen fermentation, and linseed oil exhibited a superior effect in promoting the growth of Hu ewe lambs.

Key words: Hu sheep ewe lambs; linseed oil; sunflower oil; growth performance; slaughter performance; blood parameters

羔羊的科学培育是养羊业可持续发展的基石,早期培育对其生长发育、健康状态及未来生产潜力具有决定性作用。但在现代集约化养殖中,羔羊常面临早期断奶应激问题,这可能损坏肠道健康,进而影响生长发育与健康水平[1-2]。因此,实施精准的营养调控已成为保障羔羊高效健康养殖的核心措施。在反刍动物营养体系中,传统以玉米(*Zea mays*)为主的日粮结构存在饲料原料单一、营养供应不平衡等问题,难以满足羔羊快速生长阶段的精准营养需求。

瘤胃作为反刍动物营养消化与代谢的核心场所,其发育状况与发酵模式直接影响饲料利用效率[3-4]。已有研究显示,日粮中添加适量油脂可影响瘤胃发酵参数和动物生长[5-6]。在众多油脂来源中,富含n-3多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)的亚麻籽(*Linum usitatissimum*)油与富含n-6 PUFA的葵花籽(*Helianthus annuus*)油备受关注。二者不仅是反刍动物体内合成共轭亚油酸(conjugated linoleic acid, CLA)等具有重要生理活性脂肪酸的前体物,更能直接或间接地改善畜产品脂肪酸组成[7-8]。研究表明,CLA对人类健康具有诸多益处,包括抗癌、降血脂及抗心血管疾病等[9]。因此,在保障羔羊健康生长的同时,在日粮中添加此类功能性油脂以提升羊肉的保健价值,对于满足消费者对高品质、健康化肉产品的需求具有重要意义。

日粮中添加此类油脂有优化羔羊代谢途径、提升能量利用效率的作用。王喜乐等[8]研究表明,在山羊日粮中添加葵花籽油可促进瘤胃消化代谢,并调节瘤胃液的脂肪酸组成。Pilajun等[10]也报道,添加亚麻籽油等植物油能够改变瘤胃发酵模式,提高总挥发性脂肪酸产量和丙酸比例,从而优化机体的能量供应。武雅楠等[11]发现,在日

粮中添加亚麻籽可显著提高羔羊的平均日增重并优化肌肉的脂肪酸组成。Guo等[12]在保育猪上的研究进一步证实，较低的n-6/n-3 PUFA有助于提升生长性能并改善脂质代谢，提示不同油脂类型及其脂肪酸比例可能对动物产生差异化影响。此外，日粮脂肪酸组成的改变可能直接影响红细胞膜的流动性、稳定性以及造血功能。因此，血液生理参数如血红蛋白浓度和红细胞压积等，可作为评估机体氧转运能力、营养代谢状态及考察功能性油脂对血液生理潜在影响的重要窗口[13]。

目前，关于亚麻籽油与葵花籽油在湖羊日粮中的应用研究，多集中于肉品质以及肌肉脂肪酸组成等指标[14-15]，然而对母羔脏器发育、血液生理及瘤胃发酵等指标的研究相对较少。因此，本研究以3月龄湖羊母羔为对象，系统评估日粮中添加4%亚麻籽油与4%葵花籽油对其生长性能、屠宰性能、脏器发育、瘤胃形态与挥发性脂肪酸及血液生理指标的综合影响，旨在明确两种功能性油脂在湖羊健康养殖中的适用性与优劣差异，为肉羊产业中油脂资源的精准选用提供实践依据与理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试验设计与饲养管理

本试验于2024年4－7月在甘肃省民勤县德福农业科技公司开展，选取3月龄体重[(18.86±0.37) kg]和体况接近的健康湖羊母羔30只，每组10只。试验日粮参照《肉羊营养需要量》(NY/T 816－2021)[16]进行配制，为排除能量摄入差异对试验结果的干扰，本试验饲料配制采用等能原则，对照组(CK)日粮中添加4%过瘤胃棕榈酸脂肪粉，2个试验组分别用4%亚麻籽油(linseed oil, LO，富含n-3 PUFA)或4%葵花籽油(sunflower oil, SO，富含n-6 PUFA)替代日粮中的棕榈酸脂肪粉，使用制粒机将其混合物加工为全混合颗粒饲料，日粮组成及营养水平见表1。试验前清洗并消毒羊舍，每日于07:30和18:30进行饲喂，自由采食、饮水。

表1　基础日粮组成及营养水平

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet

项目 Item	对照组 CK	亚麻籽油组 LO	葵花籽油组 SO
原料 Ingredient			
玉米秸秆 Corn stover (%)	24.0	24.0	24.0
玉米皮 Corn bran (%)	8.0	8.0	8.0
破碎玉米 Crushed corn (%)	26.0	26.0	26.0
豆粕 Soybean meal (%)	5.0	5.0	5.0
棉籽粕 Cottonseed meal (%)	6.0	6.0	6.0
玉米胚芽粕 Corn germ meal (%)	20.0	20.0	20.0
过瘤胃脂肪－棕榈酸 RPPFA (%)	4.0	0	0
葵花籽油 Sunflower oil (%)	0	0	4.0
亚麻籽油 Linseed oil (%)	0	4.0	0
膨化尿素 Expanded urea (%)	1.0	1.0	1.0
糖蜜 Molasses (%)	3.0	3.0	3.0
食盐 NaCl (%)	0.5	0.5	0.5
石粉 Limestone (%)	1.2	1.2	1.2
碳酸氢钠 $NaHCO_3$ (%)	0.8	0.8	0.8
[1)]预混料 Premix	0.5	0.5	0.5
合计 Total	100.0	100.0	100.0
营养水平 Nutrient level			
干物质 Dry matter (DM, %)	92.26	90.92	91.45
粗蛋白 Crude protein (CP, %)	15.42	15.48	15.41
中性洗涤纤维 NDF (%)	31.43	32.76	32.10
酸性洗涤纤维 ADF (%)	15.60	14.14	14.13
[2)]代谢能 ME ($MJ \cdot kg^{-1}$)	12.57	12.64	12.57

CK: Control group; LO: Linseed oil group; SO: Sunflower oil group; RPPFA: Rumen-protected palm fatty acid; NDF: Neutral detergent fiber; ADF: Acid detergent fiber; ME: Metabolic energy; [1)]预混料为每kg饲料提供 Premix for feed per kg: Fe 25 mg, Mn 40 mg, Zn 40 mg, Cu 8 mg, I 0.3 mg, Se 0.2 mg, Co 0.1 mg, V_A 940 IU, V_D 111 IU, V_E 20 IU。[2)]代谢能为计算值，其余指标均为实测值 Metabolic energy was a calculated value, while all other indicators were measured values.

1.2　样品采集与指标测定

1.2.1　生长性能测定　试验期91 d，其中预试期7 d。在正式试验开始第0、28、56和84天分别对试验母羊进行空腹称重并称量各组剩余饲料重量，记录每组母羊采食量，并基于数据测算生长性能指标，包括平均日增重(average daily gain, ADG, $kg \cdot d^{-1}$)、平均日采食量(average daily feed intake, ADFI, $kg \cdot d^{-1}$)和料重比(feed to gain ratio, F/G)。

$$ADG = (\text{末体重} - \text{初始体重}) / \text{试验天数}$$

$$ADFI = \frac{\text{组采食量}}{\text{试验天数} \times \text{每组羊数}}$$

$$F/G = \text{平均日采食量} / \text{平均日增重}$$

1.2.2　体尺测定　分别于正式试验开始第0天及正式试验第84天测量试验母羊的体高、体斜

长、胸围和管围等体尺指标。

1.2.3 血液生理指标测定 在屠宰前对30只空腹母羊进行颈静脉采血，采集5 mL到乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)采血管中，摇匀后置于冰盒保存。后续应用血液细胞分析仪(ProCyte Dx*, IDEXX公司)测定母羊血常规指标。

1.2.4 屠宰性能测定 屠宰前24 h禁食(自由饮水)，以排除日粮残留对屠宰指标测定及瘤胃液采样的干扰。试验结束后，对30只母羊按照GB/T 9961－2008《鲜、冻胴体羊肉》[17]标准中的方法和要求进行屠宰。分别记录母羊宰前活重、胴体重、胴体长、胴体胸围、臀周长和背膘厚。

胴体重为去皮、头、内脏及前肢膝关节和后肢趾关节以下部分，整个躯体(包括肾脏及其周围脂肪)静置0.5 h后的重量。

$$\text{屠宰率}(\%)=\frac{\text{胴体重}}{\text{宰前活重}}\times 100$$

1.2.5 脏器指数测定 母羊屠宰后，分别称量心、肝、脾、肺、肾以及肠系膜脂肪、肾周脂和尾脂重量，计算各器官脏器指数。

$$\text{脏器指数}(\%)=[\text{该脏器鲜重}(\text{kg})/\text{宰前活重}(\text{kg})]\times 100$$

1.2.6 瘤胃组织切片制作及指标测量 取4%多聚甲醛磷酸缓冲液固定24 h的瘤胃组织，进行脱水、透明、浸蜡和包埋处理后，用切片机(Leica RM2235，德国)制作厚约5 μm的石蜡切片。进一步脱蜡至水和苏木精－伊红染色后，用中性树胶封片。参照Odongo等[18]描述的方法，采用OLYMPUS OlyVIA图像分析系统软件分别测量瘤胃腹囊乳头高度、宽度、瘤胃肌层厚度、黏膜厚度及角质层厚度。

1.2.7 瘤胃挥发酸的测定 试验结束屠宰时，迅速采集瘤胃内容物并经4层纱布过滤。取滤液10 mL，加入25%(w/v)偏磷酸溶液(体积比4∶1)，充分混匀后于－20 ℃条件下冷冻保存。解冻后，样品在12000 r·min^{-1}、4 ℃条件下离心15 min，收集上清液。采用Trace 1310气相色谱仪(Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, 美国)测定瘤胃挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFA)，色谱柱为CP-WAX毛细管柱(30.00 m×0.53 mm×1.00 μm)。进样口温度250 ℃，FID检测器温度280 ℃；柱温采用程序升温：初始温度100 ℃保持1 min，以10 ℃·min^{-1}升至150 ℃保持2 min，再以15 ℃·min^{-1}升至230 ℃保持3 min；载气为高纯氮气，流速1.0 mL·min^{-1}，分流比50∶1，进样量1 μL。测定指标包括乙酸(acetate)、丙酸(propionate)、异丁酸(isobutyrate)、丁酸(butyrate)、异戊酸(isovalerate)和戊酸(valerate)，并计算总挥发性脂肪酸(total volatile fatty acids, TVFA)含量及乙酸/丙酸(A∶P)。

1.3 数据统计与分析

采用Excel 2010软件整理试验数据，结果以“平均值±标准差”表示。使用SPSS 27.0中One-way ANOVA分析，并采用Duncan's法进行多重比较检验，$P<0.05$表示差异显著，$P<0.01$表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔育肥性能的影响

3组处理各阶段体重差异不显著(表2，$P>0.05$)。LO组在29～56 d日增重有升高趋势。在57～84 d，日增重显著高于CK和SO组($P<0.05$)，全期平均日增重显著高于SO组($P<0.05$)。其余阶段日增重之间差异不显著($P>0.05$)。平均日采食量及料重比各阶段间也无显著差异($P>0.05$)。

2.2 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔体尺指标的影响

在试验第0天和第84天，CK、LO与SO组湖羊母羔的体高、体斜长、胸围及管围均无显著组间差异(表3，$P>0.05$)。整个试验周期内，各组体尺指标均随生长时间呈现稳步增长，整体发育规律一致。在等能等氮的日粮前提下，分别添加4%亚麻籽油或4%葵花籽油，未显著改变湖羊母羔的体尺发育进程与整体骨架生长状况。

2.3 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羊血常规指标的影响

CK和SO组血红蛋白含量、红细胞压积和网织红细胞计数显著高于LO组(表4，$P<0.05$)，而红细胞平均血

表 2　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔育肥性能的影响

Table 2　Effects of dietary supplementation with linseed oil and sunflower oil on growth performance of ewe lambs

项目 Item	对照 CK	亚麻籽油 LO	葵花籽油 SO	标准误 SEM	P 值 P-value		
					处理 Treatment (Tr)	时间 Time (T)	处理×时间 Tr×T
体重 Body weight (kg)					0.799	<0.001	<0.001
0 d	19.28a	19.34a	19.75a	0.40	0.894		
28 d	25.66a	25.16a	25.38a	0.51	0.924		
56 d	33.88a	33.79a	32.71a	0.66	0.760		
84 d	40.19a	41.49a	38.16a	0.77	0.232		
阶段日增重 Stage average daily gain (kg·d^{-1})					0.015	0.021	0.010
0～28 d	0.23a	0.21a	0.20a	0.01	0.301		
29～56 d	0.29a	0.31a	0.26a	0.01	0.062		
57～84 d	0.23b	0.28a	0.19b	0.01	0.001		
ADG (kg·d^{-1})	0.25a	0.26a	0.22b	0.01	0.015		
ADFI (kg·d^{-1})	1.58a	1.57a	1.46a	0.01	—		
F/G	6.43a	6.07a	6.74a	0.15	—		

CK：Control group；LO：Linseed oil group；SO：Sunflower oil group；同行不同字母表示处理组间差异显著（$P<0.05$）Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among treatment groups（$P<0.05$）；—：未做统计学分析 No statistical analysis was performed；下同 The same below.

表 3　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔体尺指标的影响

Table 3　Effects of dietary supplementation with linseed oil and sunflower oil on body measurements of ewe lambs (cm)

时间 Time	项目 Item	对照 CK	亚麻籽油 LO	葵花籽油 SO	标准误 SEM	P 值 P-value
0 d	体高 Height at withers	58.30a	57.55a	58.50a	0.51	0.734
	体斜长 Body length	61.80a	60.91a	62.38a	0.45	0.422
	胸围 Heart girth	65.90a	66.09a	67.00a	0.50	0.676
	管围 Cannon circumference	7.00a	7.00a	7.19a	0.07	0.522
84 d	体高 Height at withers	66.00a	66.18a	64.75a	0.39	0.310
	体斜长 Body length	72.20a	72.64a	72.00a	0.50	0.874
	胸围 Heart girth	86.60a	84.82a	86.13a	0.59	0.426
	管围 Cannon circumference	8.15a	8.05a	7.69a	0.09	0.098

红蛋白浓度则相反；CK 组红细胞平均体积显著高于 LO 组（$P<0.05$），而与 SO 组没有显著差异（$P>0.05$），其他血常规指标 3 组之间均没有显著差异（$P>0.05$）。

2.4　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羊屠宰性能的影响

CK、LO 与 SO 组湖羊母羔的宰前活重、胴体重、屠宰率、胴体长、胴体胸围及臀周长等指标组间均无显著差异（表 5，$P>0.05$）。在等能等氮的日粮前提下，日粮添加 4% 亚麻籽油或葵花籽油，不会显著改变湖羊母羔的整体屠宰性能与胴体发育状况。

2.5　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羊器官和脂肪重量的影响

CK 组脾重和脾脏指数均显著高于 LO 与 SO 组（$P<0.05$），LO 组肺重显著高于 CK 与 SO 组（$P<0.05$），各组间心、肝、肾、肾周脂、肠系脂、尾脂及脂肪总重等指标均无显著差异（表 6，$P>0.05$）。日粮添加 4% 亚麻籽油或葵花籽油可显著影响母羔脾脏与肺脏发育，但对整体脂肪沉积无显著调控作用。

表4 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羊血常规指标的影响

Table 4 Effects of dietary supplementation with linseed oil and sunflower oil on hematological parameters in ewe lambs

项目 Item	对照 CK	亚麻籽油 LO	葵花籽油 SO	标准误 SEM	*P* 值 *P*-value
红细胞总数 Red blood cell count (RBC, M·μL^{-1})	14.76a	14.11a	15.17a	0.22	0.136
血红蛋白 Hemoglobin (HGB, g·dL^{-1})	12.58a	11.76b	12.51a	0.16	0.048
红细胞平均体积 Mean corpuscular volume (MCV, fL)	24.86a	22.08b	23.34ab	2.56	0.039
红细胞压积 Hematocrit (HCT, %)	36.50a	31.06b	35.34a	0.71	0.001
平均血红蛋白量 Mean corpuscular hemoglobin (MCH, pg)	8.54a	8.36a	8.26a	0.09	0.449
红细胞平均血红蛋白浓度 MCHC (g·dL^{-1})	34.58b	38.10a	35.48b	0.50	0.004
网织红细胞计数 Reticulocyte count (RET, ×10^{9}·L^{-1})	4.93a	2.83b	5.14a	0.41	0.031
血小板计数 Platelet count (PLT, ×10^{9}·L^{-1})	496.00a	542.45a	585.14a	24.67	0.397
白细胞计数 White blood cell count (WBC, ×10^{9}·L^{-1})	11.86a	11.51a	10.83a	0.37	0.556
嗜中性粒细胞数 Neutrophil count (NEUT, ×10^{9}·L^{-1})	4.84a	4.59a	4.04a	0.28	0.535
单核细胞数 Monocyte count (MONO, ×10^{9}·L^{-1})	0.83a	0.72a	1.03a	0.09	0.369
淋巴细胞数 Lymphocyte count (LYMPH, ×10^{9}·L^{-1})	5.45a	5.90a	5.60a	0.25	0.757
嗜碱性粒细胞数 Basophil count (BASO, ×10^{9}·L^{-1})	0.08a	0.09a	0.08a	0.01	0.949
嗜酸性粒细胞数 Eosinophil count (EO, ×10^{9}·L^{-1})	0.07a	0.07a	0.09a	0.01	0.686

MCHC: Mean corpuscular hemoglobin concentration.

表5 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羊屠宰性能的影响

Table 5 Effects of dietary supplementation with linseed oil and sunflower oil on slaughter performance in ewe lambs

项目 Item	对照组 CK	亚麻籽油组 LO	葵花籽油组 SO	标准误 SEM	*P* 值 *P*-value
宰前活重 Slaughter weight (kg)	37.85a	38.94a	35.43a	0.78	0.187
胴体重 Carcass weight (kg)	20.84a	21.45a	19.56a	0.49	0.283
屠宰率 Dressing percentage (%)	55.03a	54.97a	55.12a	0.29	0.978
胴体长 Carcass length (cm)	61.90a	61.64a	55.11a	2.09	0.359
胴体胸围 Carcass chest circumference (cm)	71.20a	70.91a	70.11a	0.52	0.707
臀周长 Rump circumference (cm)	62.30a	54.64a	47.89a	3.38	0.244

表6 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羊各器官及脂肪重量的影响

Table 6 Effects of dietary supplementation with linseed oil and sunflower oil on organ weights and adipose tissue deposition in ewes

项目 Item	对照组 CK	亚麻籽油组 LO	葵花籽油组 SO	标准误 SEM	*P* 值 *P*-value
心重 Heart weight (kg)	0.16a	0.17a	0.16a	0.004	0.427
心脏指数 Relative heart weight (%)	0.43a	0.43a	0.44a	0.010	0.901
肝重 Liver weight (kg)	0.74a	0.81a	0.74a	0.020	0.278
肝脏指数 Relative liver weight (%)	1.94a	2.07a	2.09a	0.030	0.066
脾重 Spleen weight (kg)	0.06a	0.05b	0.04b	0.002	0.001
脾脏指数 Relative spleen weight (%)	0.16a	0.13b	0.13b	0.010	0.027
肺重 Lung weight (kg)	0.56b	0.63a	0.54b	0.014	0.013
肺脏指数 Relative lung weight (%)	1.48a	1.64a	1.53a	0.040	0.288
肾重 Kidney weight (kg)	0.15a	0.14a	0.12a	0.013	0.740
肾脏指数 Relative kidney weight (%)	0.39a	0.35a	0.35a	0.030	0.834
肾周脂重 Perirenal fat weight (kg)	0.53a	0.62a	0.46a	0.052	0.437
肠系脂重 Mesenteric fat weight (kg)	1.04a	0.86a	1.04a	0.045	0.133
尾脂重 Tail fat weight (kg)	0.71a	0.70a	0.65a	0.043	0.872
脂肪总重 Total fat weight (kg)	2.28a	2.18a	2.15a	0.101	0.874

2.6　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔瘤胃形态学的影响

各组间瘤胃乳头高度、乳头宽度、角质层厚度、肌层厚度及黏膜下层厚度均无显著组间差异(表7,$P>0.05$)。结合图1瘤胃组织切片观察结果可见,在本试验等能日粮条件下,以亚麻籽油或葵花籽油替代过瘤胃棕榈酸脂肪粉,未对湖羊母羔瘤胃组织结构与形态发育产生显著作用。

表7　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔瘤胃形态学的影响

Table 7　Effects of dietary supplementation with linseed oil and sunflower oil on rumen morphological development in ewe lambs (μm)

项目 Item	对照 CK	亚麻籽油 LO	葵花籽油 SO	*P* 值 *P*-value
乳头高度 Papillae height	1584.38±106.17a	1723.48±212.09a	2146.03±346.26a	0.25
乳头宽度 Papillae width	333.14±17.82a	331.58±33.65a	335.77±11.19a	0.99
角质层厚度 Stratum corneum thickness	25.12±2.85a	33.21±3.33a	29.40±4.92a	0.41
肌层厚度 Muscular layer thickness	1283.29±109.43a	1342.08±95.34a	1317.77±114.87a	0.93
黏膜下层厚度 Submucosa layer thickness	253.68±20.84a	330.12±32.99a	282.86±28.78a	0.21

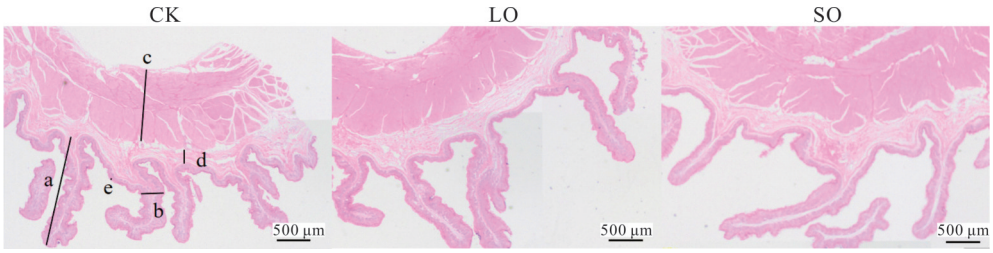

图1　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油后的瘤胃组织切片

Fig. 1　Rumen histology after dietary supplementation with linseed oils and sunflower oils

a: 乳头高度 Papillae height; b: 乳头宽度 Papillae width; c: 肌层厚度 Muscular layer thickness; d: 黏膜下层厚度 Submucosa layer thickness; e: 角质层厚度 Stratum corneum thickness.

2.7　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔瘤胃挥发酸的影响

LO和SO组瘤胃液中丙酸、丁酸、异丁酸、异戊酸、戊酸及总挥发性脂肪酸浓度显著高于CK组($P<0.05$),LO和SO组的乙酸/丙酸显著低于CK组($P<0.05$)。3组间乙酸浓度无显著差异(表8,$P>0.05$)。日粮添加4%亚麻籽油或葵花籽油可显著优化湖羊母羔瘤胃发酵模式,提高总挥发性脂肪酸产量向丙酸型发酵转变。

表8　日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔瘤胃挥发性脂肪酸的影响

Table 8　Effects of dietary supplementation with linseed oil and sunflower oil on volatile fatty acids (VFA) in the rumen of ewe lambs

项目 Item	对照 CK	亚麻籽油 LO	葵花籽油 SO	*P* 值 *P*-value
乙酸 Acetate (A, %)	65.93a	56.62a	55.63a	0.201
丙酸 Propionate (P, %)	21.31b	22.84a	25.19a	0.005
异丁酸 Isobutyrate (%)	1.90b	2.24a	2.28a	0.005
丁酸 Butyrate (%)	6.11b	12.19a	10.72a	0.002
异戊酸 Isovalerate (%)	3.25b	4.12a	4.15a	0.010
戊酸 Valerate (%)	1.50b	1.98a	2.05a	0.003
TVFA (mmol·L^{-1})	39.42±7.93b	54.56±12.38a	61.86±7.69a	0.026
乙酸/丙酸 A:P	3.20±0.23a	2.47±0.22b	2.30±0.28b	<0.001

TVFA: 总挥发性脂肪酸 Total volatile fatty acids.

3 讨论

3.1 日粮中添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔育肥性能的影响

平均日增重、采食量及料重比是评价反刍动物育肥性能的核心指标，直接反映日粮营养调控对动物生长发育的影响效果。米晓民等[19]在肉羊育肥试验中证实，日粮添加8%亚麻籽可显著提升羔羊生产性能，本研究中LO组(57～84 d)育肥效果优于CK组的趋势与其结果一致。此外，段卫平等[20]在仔猪试验中也发现，适量亚麻籽添加可显著提高ADG并降低料重比，说明n-3 PUFA在不同物种中均具有一定的促生长潜力。除亚麻籽外，其他植物油对瘤胃发酵及生产性能的影响也存在物种特异性，Hartanto等[21]研究发现，日粮添加葵花籽油可通过抑制瘤胃原虫增殖、降低瘤胃氨氮浓度，优化瘤胃发酵模式并提升能量利用效率，最终显著提高山羊的育肥性能。但Mitchaothai等[22]在生长育肥猪试验中发现，5%葵花籽油添加虽能提高粗脂肪和粗蛋白表观消化率，但对ADG和料重比无显著影响，推测其可能与单胃动物和反刍动物的消化生理机制差异有关。本研究中LO和CK组全期ADG显著高于SO组，终末体重表现为LO组＞CK组＞SO组，与上述文献报道皆一致，其原因可能是适量亚麻籽油可能通过独特的n-3 PUFA组成，在维持瘤胃功能稳定的同时，改善了机体的代谢健康与养分分配效率，从而促进了母羔的生长；本研究中SO组促生长效果不显著，可能与其n-6 PUFA的特定代谢途径或对瘤胃微生物区系的不同调控作用有关。

体尺与屠宰性能是反映动物整体发育与产肉能力的重要指标。本研究显示，3组间体尺指标、宰前活重、胴体重、屠宰率等均无显著差异，说明在等能日粮条件下，不同油脂来源未对湖羊母羔的整体产肉性能产生显著影响。该结果与Nguyen等[23]报道的菜籽油或亚麻籽油对羊胴体性状无负面影响的研究一致，表明日粮总营养水平可能是影响屠宰性能的主导因素，而脂肪酸组成的差异在其单独作用时效应有限。尽管外在的生产性能指标相近，但日粮油脂来源可能通过其特定的脂肪酸组成对机体的内在器官发育和生理状态产生差异化调节。这一点在脏器指数上有所体现：CK组脾脏指数显著高于LO与SO组，而LO与SO组肝脏指数有高于CK组的趋势。脾脏作为重要的免疫和红细胞清除器官，其指数变化可能反映机体免疫状态或红细胞更新率的差异[24-25]，而肝脏作为代谢中枢，其指数变化则可能与脂质代谢负荷有关[26]。本研究观察到LO组血红蛋白与红细胞压积显著降低，或可与脾脏指数的变化相互印证，提示亚麻籽油可能轻微影响了红细胞的代谢或周转。油脂中PUFA的添加可能通过影响细胞膜脂肪酸组成及类二十烷酸代谢，间接调节免疫器官功能与造血稳态，其具体机制有待进一步研究。

3.2 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔血液生理指标的影响

血液生理指标可以直接反映机体营养代谢状态、免疫功能及健康状况，其中血常规指标中的血红蛋白(hemoglobin，HGB)、红细胞压积(hematocrit，HCT)等直接关联机体氧运输能力与造血功能，是评价动物生理稳态的关键参数[13]。本试验中，LO组HGB和HCT均显著低于CK与SO组，但所有数值均处于绵羊正常生理范围，提示亚麻籽油对造血功能未造成不良影响，可能仅引起生理范围内的适应性调节。红细胞平均血红蛋白浓度(mean corpuscular hemoglobin concentration，MCHC)在LO组中显著升高，说明单个红细胞内血红蛋白密度有所增加，这可能是机体对红细胞数量或体积变化的代偿反应。SO组各项血液参数与CK组无显著差异，表明葵花籽油对血液生理状态影响较小。因此，两种油脂均未引起病理性的血液指标改变，在本试验条件下对湖羊母羔健康无不利影响。

3.3 日粮添加亚麻籽油和葵花籽油对母羔瘤胃发育的影响

在反刍动物瘤胃形态发育的各项指标中，乳头长度直接影响瘤胃上皮与食糜的有效接触面积，从而促进养分吸收，是衡量瘤胃发育的首要形态学指标，其次是乳头宽度和瘤胃壁厚度[27]。本研究结果显示，日粮中添加4%亚麻籽油或4%葵花籽油对湖羊母羔的瘤胃乳头长度、乳头宽度、肌层厚度、黏膜厚度及角质层厚度均未产生显著影响。这一结果提示，在3月龄湖羊母羔阶段，瘤胃的主体结构已基本发育成熟，对外源油脂干预的形态学响应较为有限。郭江鹏等[3]指出，羔羊瘤胃形态发育存在明显的时序性，早期断奶阶段是瘤胃乳头发育的关键窗口期。本试验所选羊只可能已度过该阶段，因此瘤胃形态未因油脂添加而发生显著改变。

尽管瘤胃形态未见显著变化，但LO与SO组的瘤胃发酵模式表现出明显优化，总挥发性脂肪酸、丙酸和丁酸浓度显著升高，同时乙酸/丙酸显著降低。本研究中瘤胃液TVFA浓度整体低于多数相关文献报道值[7−8]，推测其主要与屠宰前24 h禁食处理密切相关。丙酸是反刍动物糖异生的主要前体，其代谢途径较为复杂，若其生成速率超过肝脏的糖异生能力，可能导致能量转化效率下降。TVFA浓度的升高并不完全等同于吸收量的增加。若瘤胃上皮对TVFA的吸收能力未同步提升，或吸收后未能高效转化为体组织，则高TVFA浓度未必转化为生长优势。这一发酵特征的改变可能与瘤胃微生物区系结构的调整密切相关。Hartanto等[21]报道，葵花籽油可以抑制原虫对细菌的捕食，提高细菌蛋白合成效率，并促进丙酸生成，同时提高挥发性脂肪酸中丙酸和丁酸比例。张曼等[7]也发现，亚麻籽添加可显著改变牦牛瘤胃菌群结构，促进厚壁菌门等有益菌群的增殖，显著改变了瘤胃微生物的区系结构，进而优化了瘤胃发酵模式，最终提升了机体的能量利用效率。丙酸作为反刍动物肝脏糖异生的主要前体，其比例的提高有助于增强机体的葡萄糖供给与能量代谢效率；丁酸则是瘤胃上皮细胞的主要能源，并参与调控上皮细胞的增殖与屏障功能[28−29]。本试验中，LO组在生长后期（57～84 d）及全期的ADG显著高于SO组，可能与亚麻籽油调控瘤胃微生物区系、促进丙酸生成，进而提高代谢能供应有关。这表明，日粮油脂对湖羊母羔生长的促进作用，更多源于其对瘤胃发酵功能的优化，而非对瘤胃形态的直接调控。

4　结论

在湖羊母羔日粮中添加4%亚麻籽油或4%葵花籽油，二者均能显著影响瘤胃发酵功能，提升能量代谢效率，进而改善生长性能，且对羔羊健康无不良影响。其中，亚麻籽油在促进生长方面显著优于葵花籽油。本研究为富含n-3 PUFA的亚麻籽油在湖羊健康养殖中的精准应用提供了理论依据。

参考文献 References：

[1] Zhang K, Xu Y B, Yang Y X, *et al*. Gut microbiota-derived metabolites contribute negatively to hindgut barrier function development at the early weaning goat model. Animal Nutrition, 2022, 10(3): 111−123.

[2] McCoard S A, Cristobal-Carballo O, Knol F W, *et al*. Impact of early weaning on small intestine, metabolic, immune and endocrine system development, growth and body composition in artificially reared lambs. Journal of Animal Science, 2020, 98(1): skz356.

[3] Guo J P, Pan J Z, Li F D, *et al*. Effect of different early weaned day on morphological development of stomach for housed lambs. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2018, 49(5): 971−985.
郭江鹏, 潘建忠, 李发弟, 等. 不同早期断奶日龄对舍饲肉用羔羊胃组织形态发育变化的影响. 畜牧兽医学报, 2018, 49(5): 971−985.

[4] Wang X, Liu J G, Ma Y J, *et al*. Effects of compound Chinese herbal medicine additives on slaughter performance, meat quality and rumen histomorphology of Hu sheep. China Herbivore Science, 2019, 39(3): 22−25.
王霞, 刘建国, 马友记, 等. 复方中草药添加剂对湖羊屠宰性能、肉品质及瘤胃组织形态学的影响. 中国草食动物科学, 2019, 39(3): 22−25.

[5] Simionatto M, Maeda M E, Silveira D F M, *et al*. Effect of adding different levels of palm oil-protected fat in the diet of lambs concerning rumen parameters. Animal Feed Science and Technology, 2024, 310: 115929.

[6] Gu S Q, Zhu X F. Effects of dietary oil supplementation on growth performance and nutrient digestibility of fattening goats. China Feed, 2022(10): 72−75.
谷树乾, 朱雪峰. 饲料中添加油脂对育肥山羊生长性能和养分消化率的影响. 中国饲料, 2022(10): 72−75.

[7] Zhang M, Wang S X, Cheng C X, *et al*. Effects of different flaxseed level diets on growth performance, serum biochemical indexes, rumen fermentation parameters and rumen microbiota structure of house-fed yaks. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(11): 7081−7096.
张曼, 王书祥, 程晨旭, 等. 不同亚麻籽水平饲粮对舍饲牦牛生长性能、血清生化指标、瘤胃发酵参数及瘤胃菌群结构的影响. 动物营养学报, 2024, 36(11): 7081−7096.

[8] Wang X L, Shen X Z, Yang J H, *et al*. Effects of sunflower seed oil supplementation on rumen digestion and fatty acids composition in goats. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2007, 38(4): 356−361.
王喜乐, 沈向真, 杨俊花, 等. 添喂葵花籽油对山羊瘤胃消化代谢与瘤胃液脂肪酸组成的影响. 畜牧兽医学报, 2007, 38(4):

356－361.

[9] Wahle W K, Heys D, Rotondo D. Conjugated linoleic acids: Are they beneficial or detrimental to health? Progress in Lipid Research, 2004, 43(6): 553－587.

[10] Pilajun R, Wanapat M. Effect of coconut oil and mangosteen peel supplementation on ruminal fermentation, microbial population, and microbial protein synthesis in swamp buffaloes. Livestock Science, 2011, 141(2/3): 148－154.

[11] Wu Y N, Cao Y F, Gao Y X, *et al*. Effects of dietary linseed supplementation on performance, carcass characteristics and meat quality of lamb. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2012, 43(9): 1392－1400.
武雅楠, 曹玉凤, 高艳霞, 等. 日粮中添加亚麻籽对羔羊产肉性能和肉品质的影响. 畜牧兽医学报, 2012, 43(9): 1392－1400.

[12] Guo J J, Chen X Q, Zhu H L, *et al*. Effects of dietary n-6/n-3 PUFA ratio on growth performance and lipid metabolism in nursery pigs. Frontiers in Veterinary Science, 2025, 12:1643724.

[13] Zhang Z L, Li X X, Wang Y C, *et al*. Effect of yeast cultures on growth performance, blood physiological and biochemical indexes and rumen fermentation parameters in lambs. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 52(8): 3563－3573.
张兆玲, 李雄雄, 汪炎池, 等. 酵母培养物对羔羊生长性能、血液生理生化指标及瘤胃发酵参数的影响. 中国畜牧兽医, 2025, 52(8): 3563－3573.

[14] Hou L P, Liu K L, Tang D F. Effect of supplemented with flaxseed cake on performance and meat quality of fattening lambs. China Feed, 2021 (11): 129－134.
侯丽萍, 刘克礼, 唐德富. 饲粮添加亚麻籽饼对育肥羔羊生产性能和肉品质的影响. 中国饲料, 2021(11): 129－134.

[15] Wei Z Y, Wang W, Zhou L Y, *et al*. Effects of dietary extruded linseed and microalgae supplementation on serum antioxidant indexes and muscle fatty acid content of Hu sheep. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 56(4): 24－28.
魏宗友, 王伟, 周丽雅, 等. 饲粮中添加膨化亚麻籽和微藻对湖羊血清抗氧化指标和肌肉脂肪酸含量的影响. 畜牧与兽医, 2024, 56(4): 24－28.

[16] Ministry of Agriculture of the PRC. Nutrient requirements of meat-type sheep and goats: NY/T 816－2021. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
中华人民共和国农业农村部. 肉羊营养需要量: NY/T 816－2021. 北京: 中国农业出版社, 2021.

[17] General Administration of Quality Supervision, Inspection And Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 9961－2008 Fresh and frozen mutton carcass. Beijing: Standards Press of China, 2008.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 9961－2008 鲜、冻胴体羊肉. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[18] Odongo N, Alzahal O, Lindinger M, *et al*. Effects of mild heat stress and grain challenge on acid-base balance and rumen tissue histology in lambs. Journal of Animal Science, 2006, 84(2): 447－455.

[19] Mi X M, Chai X, Zhao R Y, *et al*. Effects of flaxseed on performance and fatty acid content in meat sheep. China Feed, 2018(10): 52－55.
米晓民, 柴霞, 赵瑞媛, 等. 亚麻籽对肉羊生产性能和脂肪酸含量的影响. 中国饲料, 2018(10): 52－55.

[20] Duan W P, Li T X. Effect of flaxseed on growth performance, antioxidant capacity and serum pro-inflammatory cytokines of weaned piglets. China Feed, 2021(24): 41－45.
段卫平, 李同新. 亚麻籽对断奶仔猪生长性能、抗氧化功能和血清促炎因子含量的影响. 中国饲料, 2021(24): 41－45.

[21] Hartanto R, Cai L Y, Yu J K, *et al*. Effects of sunflower oil supplementation on performance, nutrient digestibility, rumen fermentation and blood metabolites in crossbred (Macheng Black×Boer) goats. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2019, 31(1): 1－6.

[22] Mitchaothai J, Everts H, Yuangklang C, *et al*. Digestion and deposition of individual fatty acids in growing-finishing pigs fed diets containing either beef tallow or sunflower oil. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2008, 92(4): 502－510.

[23] Nguyen D V, Malau-Aduli B S, Nichols P D, *et al*. Growth performance and carcass characteristics of Australian prime lambs supplemented with pellets containing canola oil or flaxseed oil. Animal Production Science, 2018, 58(11): 2100－2108.

[24] Wang F W, Luo X Y, Wang Z F, *et al*. Research progress on the development of animal spleen. Journal of Domestic Animal Ecology, 2021, 42(12): 9－13.

汪富文，罗小雨，王朝飞，等. 动物脾脏发育研究进展. 家畜生态学报，2021，42(12)：9－13.

[25] Li X. Effect of compound probiotics preparation on growth performance，diarrhea rate and immune function of weaned piglets. China Feed，2023(6)：53－56.
李雄. 复合益生菌制剂对断奶仔猪生长性能、腹泻率及免疫功能的影响. 中国饲料，2023(6)：53－56.

[26] Jiang J L，Xi M J，Wang B，*et al*. Effects of methionine on liver health of ruminants and its mechanisms. Chinese Journal of Animal Nutrition，2024，36(11)：6853－6863.
姜佳利，席敏杰，王博，等. 蛋氨酸对反刍动物肝脏健康的影响及其机制. 动物营养学报，2024，36(11)：6853－6863.

[27] Lesmeister K E，Tozer P R，Heinrichs A J. Development and analysis of a rumen tissue sampling procedure. Journal of Dairy Science，2004，87(5)：1336－1344.

[28] Suárez B J，Van Reenen C G，Stockhofe N，*et al*. Effect of roughage source and roughage to concentrate ratio on animal performance and rumen development in veal calves. Journal of Dairy Science，2007，90(5)：2390－2403.

[29] Beiranvand H，Ghorbani G R，Khorvash M，*et al*. Forage and sugar in dairy calves' starter diet and their interaction on performance，weaning age and rumen fermentation. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition，2014，98(3)：439－445.