

饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛生产性能及牛奶中脂肪酸组成的影响

许鹏¹ 杨致玲¹ 吴树峰² 段增亮¹ 王亚茹¹ 曹名玉¹ 高荣琨^{3*}
张拴林^{1*} 刘强¹ 郭刚¹

(1.山西农业大学动物科学学院,太谷 030801;2.山西欣东检测技术有限公司,孝义 032300;

3.山西农业大学动物医学学院,太谷 030801)

摘要: 本试验旨在研究饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛生产性能及牛奶中脂肪酸组成的影响。试验选用 24 头泌乳量和分娩期相近的荷斯坦奶牛,按照随机区组法分为 3 组,每组 8 头牛,第 1 组饲喂由全株玉米青贮饲料、苜蓿干草和精补料组成的基础饲料;第 2 组和第 3 组分别在基础饲料中添加过瘤胃不饱和脂肪和过瘤胃饱和脂肪,添加量均为 200 g/d。预试期 7 d,正试期 60 d。结果表明:1)与第 1 组相比,添加不同过瘤胃脂肪源对干物质采食量、泌乳量、乳脂率、乳脂产量、乳蛋白产量和饲料转化率的影响不显著($P>0.05$),第 2 组和第 3 组的乳蛋白率和体细胞数分别显著高于和低于第 1 组($P<0.05$)。2)试验前期第 3 组血清中脂肪酸甘油三酯脂肪酶的活性显著高于第 1 组和第 2 组($P<0.05$),后期第 3 组血清中脂肪酸甘油三酯脂肪酶的活性显著高于第 2 组($P<0.05$),其余各组之间差异不显著($P>0.05$);试验期血清中乙酰辅酶 A 羧化酶、肉毒碱棕榈酰转移酶-I、谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性各组间差异不显著($P>0.05$)。3)试验前期第 2 组和第 3 组血清中胰岛素和胰岛素样生长因子-I 含量均显著高于第 1 组($P<0.05$),后期第 2 组血清胰岛素含量显著高于第 1 组和第 3 组($P<0.05$),后期其他血清激素含量各组间差异不显著($P>0.05$)。4)试验前期添加过瘤胃脂肪显著降低了血清中 β -羟丁酸和非酯化脂肪酸含量($P<0.05$),试验后期血清丙二醛含量显著下降($P>0.05$),其余指标各组间差异不显著($P>0.05$)。5)添加不同过瘤胃脂肪源能有效减缓体况的下降($P<0.05$)。6)试验后期第 2 组牛奶中的 C18:1n9c、C18:2n6c 和总不饱和脂肪酸含量比其余组显著增加($P<0.05$),而总的饱和脂肪酸含量比第 3 组显著下降($P<0.05$),第 3 组中的 C16:0 和总饱和脂肪酸含量比其余组显著增加($P<0.05$),其余各种脂肪酸含量各组间差异不显著($P>0.05$)。综上所述,添加过瘤胃脂肪可提高牛奶中乳蛋白率,降低血清中丙二醛含量,改善体况,其中添加过瘤胃不饱和脂肪还能提高牛奶中油酸和亚油酸含量,改善乳品质量。

关键词: 奶牛;过瘤胃不饱和脂肪;体况;表观消化率;脂肪酸

中图分类号:S823

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2021)05-2727-11

据《中国奶业统计摘要》数据,我国奶牛平均单产从 2000 年至 2018 年提高了 149.58%,一方

面,随着奶牛生产潜力的不断挖掘,处于泌乳高峰期奶牛的能量负平衡将进一步加剧;而另一方面,

收稿日期:2020-10-10

基金项目:健康功能畜产品生产技术研究与应用(201703D211001-05-04);山西省科技攻关项目(20140311022-2);山西现代农业牛产业技术体系(19-05)

作者简介:许鹏(1996—),男,山西太原人,硕士研究生,研究方向为反刍动物营养。E-mail: 783727437@qq.com

*通信作者:高荣琨,副教授,硕士生导师,E-mail: rongkungao@126.com;张拴林,教授,硕士生导师,E-mail: shuanlinzhang@126.com

牛奶中的饱和脂肪酸(SFA)占乳脂肪的60%~66%^[1-2],SFA可提高人体血液中低密度脂蛋白胆固醇的含量,有引发心血管疾病的潜在危险^[3]。在奶牛饲料中添加植物油可以满足其对饲料能量不断提高的需求,不仅能避免泌乳前期能量负平衡导致体重快速下降对其健康造成的影响^[4],而且能提高乳中多不饱和脂肪酸的含量^[5-6]。在荷兰改良牛的基础饲料中添加1.8%的生大豆油、加热的大豆油及相应水平的全棉籽,不仅降低了干物质(DM)、中性洗涤纤维(NDF)和非纤维碳水化合物化合物的表观消化率,同时也降低了乳脂率、乳蛋白率和无脂固形物含量^[7]。饲喂3%的胡麻油,降低了娟姗牛牛奶中的乳脂率、乳蛋白率和酸性洗涤纤维(ADF)的表观消化率^[8]。饲料添加4.0%胡麻油、棕榈油和相应水平的全脂大豆均降低了瘤胃原虫数量,胡麻油组有机物(OM)和NDF的表观消化率均显著下降^[9],添加10%的胡麻籽^[10]或膨化的胡麻籽^[11]时,均提高了牛奶中亚麻酸含量。当饲料分别添加0%、5%、10%和15%的粉碎胡麻籽时,饲料OM、NDF和ADF的表观消化率随添加量增加而线性下降,牛奶中亚麻酸、共轭亚油酸(CLA)的含量则线性提高^[12]。由于多不饱和脂肪酸对瘤胃微生物有毒害作用^[13],尤其是亚麻酸会降低瘤胃原虫和甲烷菌数量^[14],一般认为植物油适宜的添加量为4%^[15],这在一定程度上限制了其应用范围和程度。过瘤胃脂肪(RPF)可以避免对瘤胃微生物的干扰,减少对瘤胃发酵的抑制作用。目前,国内普遍使用以富含棕榈油的饱和脂肪酸及脂肪酸钙皂等RPF产品。蔡瑞琪^[16]在奶牛饲料中添加200g过瘤胃饱和脂肪(RPSF)的试验结果表明,干物质采食量(DMI)和产奶量差异不显著,但显著改善了奶牛体况(BCS);李兰等^[17]在泌乳前期奶牛饲料中添加RPSF,结果表明RPSF改善了奶牛的能量负平衡;袁雪等^[18]在泌乳前期奶牛饲料中添加脂肪酸钙(不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸约各占50%)、氢化脂肪和分馏脂肪,改善了奶牛BCS,提高了生产性能。国内有关添加过瘤胃不饱和脂肪(RPUF)对泌乳早期奶牛生产性能、牛奶中脂肪酸组成和能量代谢的报道很少。因此,本试验旨在研究添加不同瘤胃脂肪源对奶牛生产性能、牛奶脂肪酸组成的影响,为不同饱和度的RPF应用于奶牛生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

RPUF以胡麻油为原料,以不饱和脂肪酸钙皂形式添加,由山西农业大学动物科学学院研制。其DM含量为97.00%,以DM为基础,脂肪含量为83.14%,其中C12:0、C14:0、C16:0、C16:1含量均为0,C18:0含量为3.74%,C18:1n9c、C18:2n6c和C18:3n3含量分别为18.96%、12.16%和39.83%,其余长链脂肪酸含量均为0.61%。RPSF为硬脂酸钙,DM含量为96.69%,脂肪含量为84.19%,其中C16:0含量为52.7%,硬脂酸含量为36.5%。

1.2 试验设计

试验选用健康的中国荷斯坦奶牛24头[泌乳天数(18.42±8.17)d、胎次[(2.42±1.20)胎]、体重(620.16±40.44)kg],参照胎次、产奶量和产后天数,按随机区组法分为3组,每组8头牛,第1组饲喂基础饲料,第2和3组在基础饲料中分别添加200g/dRPUF和RPSF。试验期67d,其中预试期7d,正试期为60d,前30天为试验前期,后30天为试验后期。

1.3 试验饲料及饲养管理

试验饲料组成及营养水平见表1。试验于2017年6月20日至2017年8月26日在山西永济市超人奶业有限公司进行。试验奶牛集中于同一牛舍,配置有运动场、自由卧床和水槽,饲料以全混合日粮(TMR)形式饲喂,日饲喂(05:30、11:30和18:00)和挤奶各3次,单槽饲喂,每日脂肪添加量平均分3次饲喂,每次添加TMR后立即把RPF和少量TMR搅拌后饲喂,然后再采食其余的TMR。自由饮水,每天测定和记录实际采食量,记录每天07:00和14:00牛舍和运动场温度与湿度。

1.4 样品采集及指标测定

试验开始、前期及后期结束时,连续2d挤奶后空腹称重,取平均值作为试验奶牛体重。饲料转化率为标准奶日产量除以日饲料摄入量。

试验期间每周采集TMR样品和剩余饲料,经粉碎、过筛、混匀后用四分法制样500g。测定DM、粗蛋白质(CP)、粗脂肪(EE)、NDF和ADF的含量。饲料样品中水分含量用恒温(105℃)干燥法(GB T 6435—2014)测定;CP和EE含量分别用凯氏定氮法(GB 5009.5—2010)和索氏抽提法

(GB 5009.6—2010)测定;NDF 和 ADF 含量采用 度指数(THI)。
Van Soest方法测定;用Drackley法计算牛舍温湿

表 1 试验饲料组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis)

%

项目 Items	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3
组成 Ingredients			
全株玉米青贮饲料 Whole corn silage	32.14	31.90	31.86
苜蓿草 Alfalfa	19.31	19.15	19.13
玉米 Corn	22.96	22.79	22.74
麸皮 Wheat bran	2.25	2.22	2.22
豆粕 Soybean meal	9.09	9.03	9.02
棉籽粕 Cottonseed meal	4.79	4.77	4.73
玉米干酒糟及其可溶物 Corn DDGS	2.57	2.53	2.55
全棉籽 Whole cotton seed	3.80	3.48	3.51
小苏打 NaHCO ₃	0.58	0.55	0.59
预混料 Premix ¹⁾	2.51	2.48	2.48
过瘤胃脂肪 RPF		1.10	1.17
合计 Total	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ²⁾			
泌乳净能 NE _L /(MJ/kg)	6.33	6.47	6.48
粗蛋白质 CP	17.20	17.01	16.99
中性洗涤纤维 NDF	30.22	29.99	29.94
酸性洗涤纤维 ADF	21.62	21.46	21.42
粗脂肪 EE	3.13	4.02	4.08
钙 Ca	1.06	1.11	1.11
磷 P	0.67	0.66	0.66

1) 预混料为每千克饲料提供 The premix provided the following per kilogram of diets: VA 4 000 IU, VD 1 200 IU, VE 15 IU, Fe 50 mg, Cu 8 mg, Zn 50 mg, Mn 50 mg, I 0.25 mg, Se 0.3 mg, Co 0.1 mg。

2) 泌乳净能根据原料组成计算所得,其中 RPF 泌乳净能按照 19.58 MJ/kg 计算,其余为实测值。NE_L was a calculated value according to ingredient composition, the NE_L value of RPF was regarded as 19.58 MJ/kg, while the other nutrient levels were measured values.

每 10 d 采集奶样 1 次,每次采集 24 h,按 3 次挤奶量的比例取样后混合制成样本,用于牛奶中乳脂率、乳蛋白率和体细胞数(SCC)等常规成分的分析。其中每期的第 2 次奶样分成 2 份,一份用于常规分析,另一份于-80 ℃冷冻保存,用于测定牛奶中脂肪酸的组成。

用福斯公司 Milko Scan FT1 多功能乳品分析仪分析牛奶中乳脂率、乳蛋白率和体细胞数等常规指标。采用 GB 5009.168—2016 的方法测定牛奶中脂肪酸组成^[19],所用仪器为气相色谱-质谱联用仪(岛津 2010),色谱条件:用 HP-5 弹性石英毛细管色谱柱(300 m×25 mm×0.25 μm),进样口温度 280 ℃,分流比 20:1,进样量 0.2 μL;质谱条件:离子源为 EI 源,电离电压 70 eV,离子源温度 280 ℃,发射电流 34.6 mA,扫描范围 30 ~

500 amp。

从每组固定选择 4 头试验奶牛,在每期的第 15 天对该 4 头奶牛进行尾静脉采血,装在促凝管中以 3 000 r/min 离心 20 min,抽取上层血清并分装于 0.5 mL 的离心管中,用于测定血清中的生化指标。血清中葡萄糖(GLU)含量用氧化酶法测定;白蛋白(ABL)含量用溴甲酚绿比色法测定;谷丙转氨酶(ALT)活性用微板法测定;谷草转氨酶(AST)活性用赖氏法测定;尿素氮(UN)含量用二乙酰肼比色法测定;丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸法(GB 5009.181—2016)测定,这些指标的检测仪器均为 UV-2802 紫外可见分光光度计。血清 β-羟丁酸(BHBA)、非酯化脂肪酸(NEFA)、胰岛素(INS)、生长激素(GH)、胰高血糖素(GC)和类胰岛素生长因子-I(IGF-I)的含量和肉碱

棕榈酰转移酶-I (CPT-I)、乙酰辅酶A羧化酶(ACC)、脂肪酸甘油三酯脂肪酶(ATGL)的活性使用酶标仪测定。

在试验前后由本场体况评分师对所有试验奶牛用5分制进行BCS,同时在挤奶后进行体尺测量,根据胸围和体斜长估测体重。

$$\text{估测体重(kg)} = \frac{\text{胸围} \times \text{胸围} \times \text{体斜长}}{10\ 800}$$

式中:胸围和体斜长单位均为cm。

1.5 数据统计处理方法

用Excel 2010对试验结果进行简单数据整理后,用SAS 8.0的ANOVA模块对除体重和体况之外的指标进行单因素方差分析,体重和体况指标进行2×3两因素方差分析,用Duncan氏法进行多

重比较,分析结果用平均值±标准差来表示。 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 饲粮添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛生产性能及乳品质的影响

由表2可知,添加不同过瘤胃脂肪源对泌乳量、乳脂率、乳脂产量、乳蛋白产量和饲料转化率的影响不显著($P > 0.05$),前期第1组DMI显著高于第3组($P < 0.05$),对后期和试验期的DMI影响不显著($P > 0.05$),后期和试验期第2组和第3组的乳蛋白率和SCC分别显著高于和低于第1组($P < 0.05$)。

表2 饲粮添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛生产性能及乳品质的影响

Table 2 Effects of dietary different RPF sources on performance and milk quality of dairy cattle

期别 Stages	组别 Groups	干物质 采食量 DMI/kg	泌乳量 Milk yield/ kg	乳脂率 Milk fat rate/%	乳蛋白率 Milk protein rate/%	乳脂产量 Milk fat yield/kg	乳蛋白产量 Milk protein yield/kg	体细胞数 SCC/ (万个/mL)	饲料 转化率 FCR
前期 Early stage	1	18.05 ±1.36 ^a	33.42 ±1.89	3.97 ±0.79	2.96 ±0.27	36.67 ±6.84	29.04 ±3.47	14.33 ±18.41	1.85 ±0.23
	2	17.53 ±1.26 ^{ab}	34.96 ±4.44	4.26 ±1.19	3.00 ±0.21	43.59 ±13.29	31.65 ±5.49	2.98 ±0.69	2.07 ±0.42
	3	16.33 ±1.16 ^b	34.04 ±4.32	4.19 ±0.79	3.15 ±0.34	41.94 ±7.69	32.22 ±4.34	4.11 ±2.23	2.14 ±0.30
	SEM	0.446	1.256	0.327	0.093	3.279	1.568	2.515	0.113
	P值 P-value	0.044	0.440	0.813	0.246	0.257	0.111	0.113	0.094
后期 Later stage	1	17.10 ±0.91	33.89 ±3.16	3.66 ±1.45	3.00 ±0.66 ^b	37.71 ±11.91	29.98 ±7.65	5.22 ±3.52 ^a	1.86 ±0.31
	2	17.72 ±0.96	33.96 ±5.38	3.35 ±0.67	3.35 ±0.27 ^a	32.89 ±5.62	34.16 ±6.24	2.82 ±1.82 ^b	1.71 ±0.20
	3	16.48 ±0.80	33.50 ±5.29	3.49 ±0.80	3.43 ±0.37 ^a	34.64 ±10.48	34.64 ±6.44	3.12 ±1.34 ^b	1.88 ±0.41
	SEM	0.336	1.629	0.343	0.150	3.302	2.397	0.745	0.108
	P值 P-value	0.053	0.919	0.808	0.021	0.664	0.183	0.039	0.523
试验期 Experimen- tal stage	1	17.57 ±0.77	33.46 ±2.10	3.77 ±0.91	2.96 ±0.42 ^b	74.38 ±13.87	59.03 ±9.59	9.77 ±10.85 ^a	1.84 ±0.22
	2	17.62 ±0.99	34.40 ±4.83	3.76 ±0.64	3.19 ±0.20 ^a	76.49 ±13.28	65.81 ±10.98	2.90 ±0.76 ^b	1.87 ±0.23
	3	16.42 ±0.74	33.74 ±4.77	3.79 ±0.57	3.31 ±0.33 ^a	76.58 ±14.55	66.85 ±9.92	3.62 ±1.28 ^b	2.00 ±0.34
	SEM	0.294	1.379	0.247	0.113	4.915	3.691	1.519	0.093
	P值 P-value	0.052	0.713	0.954	0.039	0.938	0.070	0.042	0.381

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),相同或无字母表示差异不显著($P > 0.05$)。表6、表7同。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P < 0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P > 0.05$). The same as Table 6 and Table 7.

2.2 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清酶活性的影响

由表 3 可知, 前期第 3 组血清 ATGL 活性显著高于第 1 组和第 2 组 ($P < 0.05$), 后期第 3 组血

清 ATGL 活性显著高于第 2 组 ($P < 0.05$); 前期和后期血清 ACC、CPT- I、AST 和 ALT 活性各组间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 3 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清酶活性的影响

Table 3 Effects of dietary different RPF sources on serum enzyme activities of dairy cattle

期别 Stages	项目 Items	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	SEM	P 值 P-value
前期 Early stage	三酰基甘油酯酶 ATGL/(pmol/L)	168.59±10.33 ^b	170.40±11.23 ^b	215.32±12.00 ^a	5.603	0.021
	乙酰辅酶 A 羧化酶 ACC/(ng/mL)	4.06±0.57	4.32±0.63	6.27±0.78	0.330	0.288
	肉碱棕榈酰转移酶- I CPT- I/(ng/mL)	8.97±1.14	10.03±1.06	8.96±1.05	0.542	0.611
	谷草转氨酶 AST/(U/L)	48.08±8.27	63.48±5.28	57.62±4.36	2.985	0.134
	谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	104.10±18.45	105.18±12.37	133.61±14.84	7.610	0.141
后期 Later stage	三酰基甘油酯酶 ATGL/(pmol/L)	140.93±9.43 ^{ab}	104.72±10.02 ^b	153.32±8.98 ^a	4.738	0.034
	乙酰辅酶 A 羧化酶 ACC/(ng/mL)	7.70±0.93	8.27±0.73	8.05±0.47	0.355	0.485
	肉碱棕榈酰转移酶- I CPT- I/(ng/mL)	8.29±0.82	8.33±0.53	6.29±1.01	0.393	0.321
	谷草转氨酶 AST/(U/L)	49.67±4.55	51.45±4.64	46.01±5.37	2.427	0.364
	谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	93.46±10.66	108.76±13.72	94.24±13.98	6.393	0.627

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同或无字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。表 4、表 5 同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P < 0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P > 0.05$). The same as Table 4 and Table 5.

2.3 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清激素含量的影响

由表 4 可知, 前期第 2 组和第 3 组血清 INS 和 IGF- I 含量均显著高于第 1 组 ($P < 0.05$), 第 1 组和第 2 组之间差异不显著 ($P > 0.05$), 而血清 GC

和 GH 含量在各组之间差异不显著 ($P > 0.05$); 后期第 2 组血清 INS 含量显著高于第 1 组和第 3 组 ($P < 0.05$), 而第 1 组和第 3 组之间差异不显著 ($P > 0.05$), 后期血清 GC、GH 和 IGF- I 含量在各组间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 4 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清激素含量的影响

Table 4 Effects of dietary different RPF sources on serum hormone contents of dairy cattle

期别 Stages	项目 Items	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	SEM	P 值 P-value
前期 Early stage	胰岛素 INS/(mIU/L)	2.97±0.84 ^b	3.71±0.45 ^a	3.25±0.20 ^a	0.248	0.048
	胰高血糖素 GC/(pg/mL)	41.42±2.16	38.99±2.03	38.56±1.79	0.997	0.602
	生长激素 GH/(μg/L)	2.69±0.49	2.03±0.66	2.45±0.25	0.233	0.483
	类胰岛素生长因子- I IGF- I/(pg/mL)	26.84±2.87 ^b	32.39±2.76 ^a	39.32±2.82 ^a	1.408	0.041
后期 Later stage	胰岛素 INS/(mIU/L)	3.17±0.43 ^b	4.47±0.25 ^a	3.74±0.75 ^{ab}	0.238	0.025
	胰高血糖素 GC/(pg/mL)	38.70±1.32	35.21±1.84	34.12±1.37	0.755	0.905
	生长激素 GH/(μg/L)	3.01±0.58	2.64±0.81	2.86±0.62	0.335	0.438
	类胰岛素生长因子- I IGF- I/(pg/mL)	29.00±2.55	27.17±2.13	33.60±2.83	1.252	0.504

2.4 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清生化指标的影响

由表 5 可知, 前期添加 RPF 显著降低了血清

BHBA 和 NEFA 含量 ($P < 0.05$), 后期血清 MDA 含量显著下降 ($P < 0.05$), 其余指标各组间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 5 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清生化指标的影响

Table 5 Effects of dietary different RPF sources on serum biochemical indices of dairy cattle

期别 Stages	项目 Items	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	SEM	P 值 P-value
前期 Early stage	丙二醛 MDA/(nmol/L)	5.60±0.84	4.00±1.24	4.06±0.91	0.498	0.093
	白蛋白 ALB/(g/L)	96.69±10.35	83.23±11.22	91.43±13.31	5.813	0.639
	尿素氮 UN/(mmol/L)	3.71±0.47	3.27±0.52	4.27±0.77	0.293	0.624
	葡萄糖 GLU/(mmol/L)	2.11±0.23 ^b	2.58±0.33 ^a	2.57±0.29 ^a	0.142	0.334
	β-羟丁酸 BHBA/(mmol/L)	0.66±0.06 ^a	0.50±0.03 ^b	0.53±0.06 ^b	0.025	0.038
后期 Later stage	非酯化脂肪酸 NEFA/(μmol/L)	586.89±5.34 ^a	369.22±3.36 ^b	376.51±3.57 ^b	2.045	0.043
	丙二醛 MDA/(nmol/L)	6.32±1.84 ^a	4.24±1.02 ^b	4.45±1.03 ^b	0.648	0.047
	白蛋白 ALB/(g/L)	73.47±10.58	91.02±13.36	81.37±11.63	5.928	0.161
	尿素氮 UN/(mmol/L)	3.36±0.35	3.59±0.32	3.43±0.36	0.172	0.462
	葡萄糖 GLU/(mmol/L)	2.27±0.58	2.33±0.33	1.97±0.29	0.200	0.499
	β-羟丁酸 BHBA/(mmol/L)	0.48±0.04	0.45±0.03	0.44±0.04	0.018	0.482
	非酯化脂肪酸 NEFA/(μmol/L)	402.42±4.36	273.53±2.72	245.12±2.46	1.590	0.637

2.5 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛体重和体况的影响

由表 6 可知,在试验前、后期体重均呈现不同程度的下降,但各组间差异不显著 ($P>0.05$)。试

验前、后期 BCS 各组间差异显著 ($P<0.05$),在试验前、后期第 1 组 BCS 差异显著 ($P<0.05$),试验后期第 2 组和第 3 组 BCS 评分显著高于第 1 组 ($P<0.05$)。

表 6 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛体况及体重的影响

Table 6 Effects of dietary different RPF sources on BCS and body weight of dairy cattle

项目 Items	前期 Early stage			后期 Later stage			SEM	P 值 P-value		
	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3		P1	P2	P3
体重 Body weight/kg	620.23 ±49.69	614.69 ±39.68	625.56 ±43.28	587.56 ±77.03	589.54 ±35.66	600.98 ±48.29	19.98	0.058	0.713	0.949
体况评分 BCS	2.69 ±0.12 ^a	2.66 ±0.13 ^{ab}	2.66 ±0.13 ^{ab}	2.44 ±0.12 ^d	2.53 ±0.16 ^{bc}	2.56 ±0.18 ^{bc}	0.06	0.001	0.472	0.115

P1、P2 和 P3 分别为试验期、处理及其交互作用的 P 值。

P1, P2 and P3 were the P-values of stage, treatment and the interaction between stage and treatment.

2.6 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛牛奶中脂肪酸组成的影响

由表 7 可知,前期牛奶中各种脂肪酸的含量组间差异均不显著 ($P>0.05$),后期第 2 组中牛奶中 C18:1n9c、C18:2n6c 和总不饱和脂肪酸含量比其余组显著增加 ($P<0.05$),而总饱和脂肪酸含量比第 3 组显著下降 ($P<0.05$),第 3 组中牛奶中 C16:0 和总饱和脂肪酸含量比其余组显著增加 ($P<0.05$),其余各种脂肪酸含量组间差异不显著 ($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛生产性能及乳品质的影响

本试验结果表明,饲料中添加 RPF 对 DMI、泌乳量、乳脂率、乳脂产量、乳蛋白产量和饲料转化率的影响不显著,第 2 组和第 3 组的乳蛋白率和 SCC 分别显著高于和低于第 1 组。袁雪等^[18]和蔡瑞琪^[16]在奶牛饲料中分别添加 500 g 不同类型脂肪(脂肪酸钙、氢化脂肪和分馏脂肪)和 200 g

RPSF, 泌乳前期各组的 DMI、产奶量和乳脂率差异均不显著; Isenberg 等^[10]研究表明, 饲喂 10% 亚麻籽对 DMI、产奶量、乳脂率、乳蛋白率、乳脂产量、乳蛋白产量、乳糖产量、饲料转化率等影响不显著, 除乳蛋白率的结果不同外, 其他指标与本试验结果一致。添加普通脂肪使 DMI 下降的原因是因为粗纤维部分的消化率下降^[20]。本试验使用的是 RPF, 对瘤胃功能影响很小, 这可能是 DMI 未改变的原因, 并由此引起对产奶量、乳脂率、乳脂产量、

乳蛋白产量、乳糖产量、饲料转化率的影响不显著。对于乳蛋白率的不同结果, 这可能是由于牛的品种、生产性能、不同生理阶段、不同饲料结构等导致的。由于糖异生是反刍动物糖的最重要来源, 丙酸是反刍动物体内糖异生的主要来源, 其次是氨基酸^[21]。本试验中产奶量平均达到 34 kg, 由于第 2 组和第 3 组添加了 RPF, 减少了氨基酸的糖异生作用, 有利于提高乳蛋白率。

表 7 饲料添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛牛奶中脂肪酸组成的影响

Table 7 Effects of dietary different RPF sources on milk fatty acid composition of dairy cattle

mg/kg

项目 Items	前期 Early stage					后期 Later stage				
	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	SEM	P 值 P-value	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	SEM	P 值 P-value
饱和脂肪酸 ΣSFA	12 375.42 ±1 704.56	16 501.53 ±2 123.78	15 493.42 ±2 276.53	101.75	0.635	5 539.82 ±792.89 ^b	7 803.17 ±1 856.67 ^b	10 003.43 ±699.78 ^a	55.83	0.043
C4:0	675.00 ±137.69	1 087.50 ±64.26	675.00 ±31.08	3.89	0.667	401.23 ±4.08	512.34 ±7.23	462.25 ±12.76	0.40	0.621
C6:0	550.00 ±68.73	833.75 ±67.21	65.00 ±7.11	3.46	0.667	353.31 ±23.34	475.27 ±16.27	369.15 ±12.41	0.87	0.504
C8:0	325.00 ±38.41	500.00 ±19.11	475.00 ±11.06	1.14	0.689	203.28 ±0.33	325.33 ±4.77	225.00 ±8.51	0.23	0.355
C10:0	587.50 ±48.09	1 002.69 ±97.24	862.50 ±43.18	3.14	0.610	400.00 ±3.27	600.00 ±9.14	425.00 ±8.47	0.35	0.221
C12:0	537.50 ±34.09	898.75 ±67.21	803.57 ±74.16	2.93	0.670	283.33 ±11.82	603.34 ±10.80	363.26 ±6.88	0.50	0.083
C14:0	1 712.50 ±84.05	2 462.50 ±70.03	2 437.50 ±80.20	3.91	0.769	500.00 ±17.78	1 725.00 ±39.43	1 012.50 ±30.27	1.46	0.082
C15:0	118.75 ±4.27	175.26 ±6.33	200.00 ±18.17	0.48	0.760	93.56 ±3.31	175.04 ±6.31	58.04 ±3.26	0.22	0.354
C16:0	5 724.73 ±172.93	7 303.56 ±191.84	7 474.56 ±262.44	10.45	0.868	2 733.33 ±29.33 ^b	2 400.00 ±117.23 ^b	6 275.00 ±164.48 ^a	5.18	0.038
C18:0	2 062.57 ±69.69	2 107.72 ±66.17	2 637.50 ±76.86	3.55	0.869	667.67 ±30.78	987.50 ±28.33	812.50 ±21.82	1.36	0.653
不饱和脂肪酸 ΣUFA	4 864.37 ±1 878.08	4 403.13 ±1 597.47	4 785.89 ±1 860.82	88.94	0.684	1 531.26 ±583.88 ^b	2 638.03 ±930.69 ^a	1 616.00 ±617.50 ^b	35.54	0.043
C14:1n5	100.00 ±5.78	152.63 ±5.03	102.26 ±7.06	0.30	0.864	ns	ns	ns		
C16:1n7	287.50 ±12.04	275.28 ±9.51	85.27 ±5.07	0.44	0.339	81.27 ±2.86	250.00 ±9.59	106.67 ±5.81	0.31	0.221
C18:1n9c	4 025.22 ±145.23	3 488.19 ±90.89	3 961.93 ±7.38	4.06	0.964	1 250.00 ±89.03 ^b	2 037.50 ±54.76 ^a	1 325.00 ±48.06 ^b	3.20	0.047
C18:2n6c	452.07 ±10.37	487.15 ±11.63	637.32 ±18.42	0.67	0.720	200.00 ±0.33 ^b	350.00 ±8.66 ^a	183.75 ±7.34 ^b	0.27	0.032

ns 为未检出。ns was not detected

SCC 是反映乳房健康程度的重要指标,本试验中,添加 RPF 均降低了 SCC,可能是添加脂肪具有抗热应激的结果,试验期奶牛经历了轻度热应激,前期和后期的 THI 分别达到了 76 和 75,各种应激均可以降低免疫力;另外,可能是因为添加 RPUF 后这些必需脂肪酸在一定条件下可以从细胞膜磷脂中释放出来,经过代谢产生具有抗炎作用的脂质调节物质^[22]。

3.2 饲粮添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清酶活性的影响

ATGL 是反映体脂肪代谢时脂肪水解的关键酶和限速酶,参与并启动脂质代谢,CPT- I 是脂肪酸 β 氧化的限速酶^[21]。这 2 种酶是反映机体脂肪组织动员和脂肪酸的 β -氧化的重要参考指标。第 3 组血清 ATGL 活性在后期高于第 2 组的原因可能是采食量较低引起的,这种影响无论在前期和后期均存在。虽然很多资料显示添加脂肪影响了采食量,但本试验并不是因为添加量较多引起的,而是 RPF 特有的气味影响的。

ACC 是脂肪酸合成的限速酶,同时也是变构酶,经磷酸化后失去活性,从而抑制脂肪酸的合成,胰岛素则能促进去磷酸化作用,提高 ACC 活性,加速脂肪酸合成^[21]。本试验中,3 组间血清 ACC 活性差异不显著,但试验牛添加 RPF 后的 ACC 活性较高。

AST 和 ALT 是动物机体内部最重要的 2 种转氨酶,能促进蛋白质的合成和抑制分解。虽然 2 种酶的活性在试验期差异不显著,但在前期第 2 组和第 3 组血清 AST 和 ALT 的活性均高于第 1 组。由此可以判断,添加 RPF 有促进蛋白质合成作用。

3.3 饲粮添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛血清激素含量、生化指标和体况的影响

反刍动物能量代谢的调节主要由 INS 和 GC 控制。泌乳前期处于能量负平衡时,机体动员体脂肪使血清葡萄糖升高,进一步引起 INS 分泌增加。

血清葡萄糖含量是机体对糖的消化、转运和代谢的综合反映。李兰等^[17]在奶牛饲粮中添加 200~400 g 的 RPF,20 d 后血清葡萄糖含量显著提高。本试验在试验前期的结果与该结果一致。泌乳前期奶牛由于泌乳量高、消化能力受限,绝大部分高产牛会出现能量负平衡。添加 RPF 能提高饲

粮能量,这些脂肪通过提供脂肪酸形式能促进糖异生作用,能在一定程度上缓解能量负平衡作用,这是添加 RPF 组血清葡萄糖含量较高的原因。

UN 含量可以反映机体的蛋白质代谢和氨基酸平衡状况,UN 含量受进食氮的影响较大。李兰等^[17]的研究表明,添加 RPF 对血清 UN 含量没有显著影响,本研究结果与李兰等^[17]研究结果一致,说明添加 RPF 对血清 UN 含量没有显著影响。

MDA 含量是反映机体抗氧化能力的重要参数,也间接反映组织过氧化损伤。奶牛在炎热的夏季和泌乳高峰阶段会产生大量活性氧,会氧化乳腺细胞膜上的多不饱和脂肪酸的磷酸残基,不饱和脂肪酸特异性减少,保持膜坚硬状态的饱和脂肪酸相对增加,引起膜结构破坏^[23],生成的脂质过氧化物分解时可产生 MDA。本试验后期正处于 8 月份,所以,后期的血清 MDA 含量不仅比前期高,且添加 RPF 组显著低于第 1 组。第 2 组添加的是 RPUF,其具有抗氧化特性,而第 3 组出现血清 MDA 含量下降现象,可能是乳腺中的去饱和脂肪酶作用的结果。

奶牛产后大量泌乳导致机体处于低血糖状态时,脂肪组织中脂肪会大量动员产生大量游离脂肪酸,血中游离脂肪酸含量的升高会促使肝脏摄取这些游离脂肪酸酯化为甘油三酯,甘油三酯可以作为极低密度脂蛋白的一部分被转运或贮存,游离脂肪酸也能被肝脏完全氧化为二氧化碳,不完全氧化时生成酮体,这是试验前期血清 NEFA 和 BHBA 含量较高的原因。

袁雪等^[18]、王瑜等^[24]在奶牛饲粮中添加不同剂量(300~500 g)的 RPF 后显著改善了试验牛体况。杨金波等^[25]证明,在基础饲粮中添加棕榈油脂对低产牛体况的改善和膘情的恢复作用显著。随着 DMI 增加,饲粮中添加 RPF 满足了产奶量快速上升期间奶牛对能量的需要,使得奶牛体脂肪动员减少,这可能是体况下降不显著的原因。

3.4 饲粮添加不同过瘤胃脂肪源对奶牛牛奶中脂肪酸组成的影响

试验前期各组的各种脂肪酸含量差异均不显著,原因可能在于试验前期体脂肪降解对于添加外源脂肪的干扰。试验前期奶牛处于泌乳高峰阶段,会出现体脂肪的大量分解,这些内源脂肪同摄入脂肪一起进入乳腺合成牛奶,当内源脂肪多于摄入脂肪时,乳腺内脂肪酸的合成以内源脂肪为

主,而奶牛体脂肪以饱和脂肪为主。而在试验后期第 2 组的牛奶 C18:1n9c、C18:2n6c 和总不饱和脂肪酸含量比其余组显著增加的原因,则可能是泌乳高峰期过后,随着泌乳量的下降和奶牛消化功能的逐渐恢复,体脂肪的分解逐渐下降并消失,此时添加的外源脂肪就会对乳腺脂肪酸的合成产生影响。因为第 2 组的 RPUF 中含有较多的 C18:2 和 C18:3,可能分别是 C18:2 和 C18:3 在乳腺内经过生物氢化作用合成 C18:1n9c 和 C18:2n6c,这点也被 Kennelly^[26] 早期研究证实。前人研究表明,在奶牛饲料中添加胡麻籽降低了牛奶中饱和脂肪酸含量和增加了单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量,但 n-3 脂肪酸含量未增加^[27],这与本试验结果一致。第 3 组由于添加的 RPSF 是以 C16:0 和 C18:0 为主,所以,第 3 组中的牛奶 C16:0 含量显著高于其余组,可能是 C18:0 在乳腺经脱饱和作用转化为 C18:1n9c,使第 3 组中的牛奶 C18:0 含量和其他组差异不显著。

4 结 论

添加 RPF 可提高牛奶中乳蛋白率,降低血清中 MAD 含量,改善体况,其中 RPUF 还能提高牛奶中油酸和亚油酸含量,改善乳品质量。

参考文献:

- [1] BAUMAN D E, LOCK A L. Milk fatty acid composition: challenges and opportunities related to human health [C] // Proceeding of the 2nd International Symposium on Dairy Cow Nutrition and Milk Quality. Beijing: [s. n.], 2011: 18-26.
- [2] 吕小青, 水明, 李聪, 等. 北京地区荷斯坦牛生乳中脂肪酸含量的分析 [J]. 中国奶牛, 2016 (3): 13-16, 17.
- LYU X Q, SHUI M, LI C, et al. The analysis of fatty acid content in milk of Chinese Holstein in Beijing area [J]. China Dairy Cattle, 2016 (3): 13-16, 17. (in Chinese)
- [3] 孙明远. 食品营养学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 356-380.
- SUN M Y. Food nutriology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 356-380. (in Chinese)
- [4] 莫放. 养牛生产学 [M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 162-163, 219-222.
- MO F. Cattle production [M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture University Press, 2010: 162-163, 219-222. (in Chinese)
- [5] PIPEROVA L S, TETER B B, BRUCKENTAL I, et al. Mammary lipogenic enzyme activity, trans fatty acids and conjugated linoleic acids are altered in lactating dairy cows fed a milk fat-depressing diet [J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130 (10): 2568-2574.
- [6] PIPEROVA L S, SAMPUGNA J, TETER B B, et al. Duodenal and milk trans octadecenoic acid and conjugated linoleic acid (CLA) isomers indicate that post-absorptive synthesis is the predominant source of cis9-containing CLA in lactating dairy cows [J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132 (6): 1235-1241.
- [7] MURTA R M, VELOSO C M, PIRES A J V, et al. Intake, apparent digestibility, production, and composition of milk from cows fed diets with different sources of lipids [J]. Revista Brasileira de Zootecnia, 2016, 45 (2): 56-62.
- [8] BROSSILLON V, REIS S F, MOURA D C, et al. Production, milk and plasma fatty acid profile, and nutrient utilization in Jersey cows fed flaxseed oil and corn grain with different particle size [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101 (3): 2127-2143.
- [9] FIORENTINI G, CARVALHO I P C, MESSANA J D, et al. Effect of lipid sources with different fatty acid profiles on intake, nutrient digestion and ruminal fermentation of feedlot nellore steers [J]. Meat Science, 2014, 98 (4): 591-598.
- [10] ISENBERG B J, SODER K J, PEREIRA B D, et al. Production, milk fatty acid profile, and nutrient utilization in grazing dairy cows supplemented with ground flaxseed [J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102 (2): 1294-1311.
- [11] VANBERGUE E, PEYRAUD J L, HURTAUD C. Effects of new n-3 fatty acid sources on milk fatty acid profile and milk fat properties in dairy cows [J]. Journal of Dairy Research, 2018, 85 (3): 265-272.
- [12] RESENDE T L, KRAFT J, SODER K J, et al. Incremental amounts of ground flaxseed decrease milk yield but increase n-3 fatty acids and conjugated linoleic acids in dairy cows fed high-forage diets [J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98 (7): 4785-4799.
- [13] JENKINS T C. Lipid Metabolism in the rumen [J]. Journal of Dairy Science, 1993, 76 (12): 3851-3863.
- [14] 张春梅. 植物油及十八碳不饱和脂肪酸对瘤胃甲烷生成和微生态的影响 [D]. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2008.
- ZHANG C M. Effects of vegetable oil and unsaturated

- octadeca carbon fatty acid on ruminal methanogenesis and microbial ecology [D]. Ph. D. Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [15] YANG S L, BU D P, WANG J Q, et al. Soybean oil and linseed oil supplementation affect profiles of ruminal microorganisms in dairy cows [J]. *Animal*, 2009, 3 (11): 1562–1569.
- [16] 蔡瑞琪. 添加过瘤胃脂肪对奶牛产后生产性能、血液生化指标及激素的影响 [D]. 硕士学位论文. 银川: 宁夏大学, 2016.
- CAI R Q. Rumen-protected fat supplementation on production performance, blood biochemical indices and hormone concentration of early lactation cows [D]. Master's Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2016. (in Chinese)
- [17] 李兰, 李徐延, 李影, 等. 过瘤胃脂肪对泌乳早期奶牛生产性能和能量代谢的影响 [J]. *畜牧与兽医*, 2013, 45 (10): 51–55.
- LI L, LI X T, LI Y, et al. Effect of rumen-protected fat on production performance and energy metabolism of early lactation cows [J]. *Animal Science and Veterinary*, 2013, 45 (10): 51–55. (in Chinese)
- [18] 袁雪, 曲永利, 韩云胜, 等. 不同类型过瘤胃脂肪对泌乳前期奶牛体况及生产性能的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2016, 52 (7): 40–45.
- YUAN X, QU Y L, HAN Y S, et al. Effect of different types of rumen-protected fat on body condition and production performance of early lactation cows [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52 (7): 40–44. (in Chinese)
- [19] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.168—2016 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, General Administration of National Food and Drug. GB 5009.168—2016 Determination of fatty acids in food [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [20] WANAPAT M, MAPATO C, PILAJUN R, et al. Effects of vegetable oil supplementation on feed intake, rumen fermentation, growth performance, and carcass characteristic of growing swamp buffalo [J]. *Livestock Science*, 2011, 135 (1): 32–37.
- [21] 周顺伍. 动物生物化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 148–149.
- ZHOU S W. *Animal biochemistry* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 148–149. (in Chinese)
- [22] KOMPRDA T, SLADEK Z, SEVCIKOVA Z, et al. Comparison of dietary oils with different polyunsaturated fatty acid n-3 and n-6 content in the rat model of cutaneous wound healing [J]. *International Journal of Molecular Science*, 2020, 21 (21): 7911–7932
- [23] 计成. 动物营养学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 77–86.
- JI C. *Animal nutrition* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 77–86. (in Chinese)
- [24] 王瑜, 洪龙, 邵怀峰, 等. 奶牛全混合日粮添加过瘤胃脂肪饲养效果对比试验研究 [J]. *中国牛业科学*, 2009, 35 (4): 14–16.
- WANG Y, HONG L, SHAO H F, et al. Effect of bypass fat on dairy cows fed with total mixed ration [J]. *China Cattle Science*, 2009, 35 (4): 14–16. (in Chinese)
- [25] 杨金波, 李非. 过瘤胃脂肪对奶牛体况及生产性能的影响 [J]. *中国奶牛*, 2002 (6): 19–21.
- YANG J B, LI F. Results of supplemental bypass fat on body condition and production of dairy cattle [J]. *China Dairy Cattle*, 2002 (6): 19–21. (in Chinese)
- [26] KENNELLY J J. The fatty acid composition of milk fat as influenced by feeding oilseeds [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1996, 60 (3/4): 137–152.
- [27] CAROPRESE M, MARZANO A, MARINO R, et al. Flaxseed supplementation improves fatty acid profile of cow milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93 (6): 591–598.

Effects of Dietary Different Rumen Protected Fat Sources on Performance and Milk Fatty Acid Composition of Dairy Cattle

XU Peng¹ YANG Zhiling¹ WU Shufeng² DUAN Zengliang¹ WANG Yaru¹ CAO Mingyu¹
GAO Rongkun^{3*} ZHANG Shuanlin^{1*} LIU Qiang¹ GUO Gang¹

(1. College of Animal Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Shanxi Xindong Testing Technology Co., Ltd., Xiaoyi 032300, China; 3. College of Veterinary Medicine, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: The objective of this study was to determine the effects of dietary different rumen protected fat sources on performance and milk fatty acid composition of dairy cattle. Twenty-four multiparous Chinese Holstein were distributed into three groups with 8 cattle in each group. Group 1 were fed a basal diet consisting of corn silage, alfalfa hay and concentrate supplement; groups 2 and 3 were fed the basal diet supplemented with 200 g rumen protected unsaturated fat and rumen protected saturated fat, respectively. The pretrial period lasted for 7 d and trial period lasted for 60 d. The results showed as follows: 1) compared with group 1, supplementation of different rumen protected fat sources had no effect on dry matter intake, yield of milk, milk fat rate, yield of milk fat, yield of milk protein and feed conversion rate ($P>0.05$), but the milk protein rate and somatic cell counts in groups 2 and 3 were significantly higher and lower than those in group 1 ($P<0.05$). 2) The serum fatty acid triglyceride lipase (ATGL) activity in group 3 in the early stage was significantly higher than that in groups 1 and 2 ($P<0.05$). The serum ATGL activity in group 3 in the later stage was significantly higher than that in group 2 ($P<0.05$), and there was no significant difference among other groups ($P>0.05$). The activities of serum acetyl-CoA carboxylase, carnitine palmitoyl transferase- I, aspartate aminotransferase and alanine transaminase had no significant difference among groups ($P>0.05$). 3) The contents of serum insulin and insulin-like growth factor- I in the early stage in groups 2 and 3 were significantly higher than those in group 1 ($P<0.05$). The serum insulin content in the later stage in group 2 was significantly higher than that in groups 1 and 3 ($P<0.05$), and there was no significant difference in other hormone indexes among groups ($P>0.05$). 4) The contents of serum β -hydroxybutyrate and non-esterified fatty acid in early stage were significantly decreased by adding rumen protected fat ($P<0.05$), the serum malonaldehyde content in later stage was significantly decreased ($P<0.05$), the other serum biochemical indices were not affected significantly ($P>0.05$). 5) Supplementation of different rumen protected fat sources alleviated body condition score decline ($P<0.05$). 6) The contents of C18:1n9c, C18:2n6c and total unsaturated fatty acids in milk in group 2 in later stage were significantly increased compared with the other groups ($P<0.05$). While the total saturated fatty acid content was significantly decreased compared with group 3 ($P<0.05$), and the contents of C16:0 and total saturated fatty acid in group 3 were significantly increased compared with other groups ($P<0.05$), and the other milk fatty acid contents had no significant difference among other groups ($P>0.05$). Overall, this study indicates that supplementation of rumen protected fat can elevate milk protein rate, reduce the content of malondialdehyde in serum, alleviate body condition score, the supplementation of unsaturated fat positively impact the content of oleic acid and linoleic acid in milk and improve the quality of milk. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(5):2727-2737]

Key words: dairy cattle; rumen protected unsaturated fat; body condition; apparent digestibility; fatty acids

* Corresponding authors: GAO Rongkun, associate professor, E-mail: rongkungao@126.com; ZHANG Shuanlin, professor, E-mail: shuanlinzhang@126.com (责任编辑 陈鑫)