

日粮添加不同脂肪酸混合物对奶牛血液脂肪酸组成及抗氧化性能的影响

赵小伟^{1,2} 王加启^{1*} 孙鹏¹ 卜登攀¹ 杨永新¹ 崔海^{1,2}
孙妍¹ 徐晓燕¹ 周凌云¹ 李发弟²

(1. 中国农业科学院 北京畜牧兽医研究所/动物营养学国家重点实验室,北京 100193;

2. 甘肃农业大学 动物科学技术学院,兰州 730070)

摘要 研究日粮添加不同脂肪酸混合物对泌乳奶牛血液脂肪酸组成及抗氧化性能的影响,选用36头健康的荷斯坦奶牛平均分为3个处理组,分别为对照组、长链脂肪酸组(LCFA)和中短链脂肪酸组(SMCFA),试验期8周,结果表明,泌乳奶牛日粮添加中短链脂肪酸可以显著降低血浆中碳链长度大于16的脂肪酸和总不饱和脂肪酸的含量(85.1%和87.94%; $P<0.05$),显著提高血浆中碳链长度小于等于16的脂肪酸和总饱和脂肪酸的含量(14.86%和12.13%; $P<0.05$)。同时,日粮添加中短链脂肪酸显著提高血浆中饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸的比值(0.41%和0.36%; $P<0.05$),显著降低了血浆中不饱和脂肪酸的含量($P<0.05$)。而日粮添加长链脂肪酸对血浆中各类脂肪酸含量影响差异不显著。试验结果还发现,日粮中添加中短链脂肪酸显著提高了血清中谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶活性($P<0.05$),降低了脂质过氧化产物丙二醛的含量,但没有达到显著水平。而日粮中添加长链脂肪酸也趋向于提高血清中谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶活性,但只有谷胱甘肽过氧化物酶达到了显著水平($P<0.05$)。同时日粮添加长链脂肪酸显著提高了血清中丙二醛含量($P<0.05$)。结果显示,中短链脂肪酸较长链脂肪酸提高了血液的抗氧化性能,降低了脂质过氧化产物的产生,但是会提高血液脂肪酸的总饱和度。

关键词 奶牛; 脂肪酸混合物; 脂肪酸; 抗氧化性能

中图分类号 S 823.91; S 816.79

文章编号 1007-4333(2011)06-0117-07

文献标志码 A

Effect of dietary supplementation with different fatty acid mixture on blood fatty acid composition and antioxidant capacity in dairy cows

ZHAO Xiao-wei^{1,2}, WANG Jia-qi^{1*}, SUN Peng¹, BU Deng-pan¹, YANG Yong-xin¹,
CUI Hai¹, SUN Yan¹, XU Xiao-yan¹, ZHOU Ling-yun¹, LI Fa-di²

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition/Institute of Animal Science,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

2. College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Our experiment was to investigate the effect of dietary supplementation with different type of fatty acid mixture on blood fatty acid profile and antioxidant capacity in dairy cows. Thirty six Chinese lactating Holstein dairy cows were randomly assigned to three treatments: 1) control, 2) long-chain fatty acid treatment (LCFA), and 3) short- and medium-chain fatty acid treatment (SMCFA). Experimental duration was 9 weeks and measurements were made during the last 8 weeks. Compared with control treatment, cows feed short- and medium-chain fatty acid significantly decreased the content of fatty acid with $C>16$ ($P<0.05$), and considerably increased the content of fatty acid with $C\leq 16$ ($P<0.05$). Meanwhile, short- and medium-chain fatty acid significantly increased the ratio of saturated fatty

收稿日期: 2011-05-12

基金项目: 国家“973”计划项目(2011CB100805)

第一作者: 赵小伟, 硕士研究生, E-mail: xiaowei1986mm@163.com

通讯作者: 王加启, 研究员, 博士生导师, 主要从事反刍动物营养与牛奶品质改良研究, E-mail: wang-jia-qi@263.com

acid and unsaturated fatty acid ($P < 0.05$), and remarkably decreased the content of unsaturated fatty acid ($P < 0.05$). On the other hand, there was no significantly effects on blood fatty acids were observed in LCFA treatment. Compared with control treatment, short- and medium-chain fatty acid tended to increase the activity of catalase and glutathione peroxidase, only glutathione peroxidase reached the significantly level ($P < 0.05$). However, LCFA treatment significantly increased malondialdehyde content in serum ($P < 0.05$). These results indicate that short- and medium-chain fatty acid would increase the antioxidant capacity of serum, and decreased the content of malondialdehyde in serum. Nevertheless, short- and medium-chain fatty acid would increase the total saturation of blood fatty acid.

Key words dairy cows; fatty acid mixture; fatty acid; antioxidant capacity

脂肪作为一种能量密度高且易被消化利用的物质,在奶牛生产中已经得到广泛的应用。奶牛特别是对于高产奶牛补饲脂肪可以显著改善机体的能量状况,避免奶牛长期处于能量负平衡,从而提高奶牛的生产性能;泌乳奶牛补饲脂肪会影响乳脂肪酸组成。研究显示,提高奶牛日粮或瘤胃后肠道中长链脂肪酸的含量可以提高乳脂中长链脂肪酸和降低中短链脂肪酸脂肪酸的含量^[1-3],而提高中短链脂肪酸的含量可以提高乳脂中中短链脂肪酸和降低长链脂肪酸的含量^[4-6],因此,可通过给泌乳奶牛补饲富含长链脂肪酸的脂肪,来改善乳脂肪酸组成。奶牛补饲脂肪也可能会改变奶牛机体组织内脂肪的动员和沉积。有报道显示,甘油三酯是体脂的主要成分,当血液中甘油三酯含量过高时,可导致动物体脂蓄积,可能会发生脂血症^[7]。另外,血液在生理条件下也会发生脂类氧化(尤其是自发氧化),主要是血液中存在产生自由基的不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)。当血液中 UFA 尤其是多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)含量升高时,形成自由基的几率也会增加。而自由基是诱导脂类自发氧化反应的初始因子,会引起脂类发生链式反应,产生脂质过氧化物产物,影响机体健康^[8],因此,奶牛补饲不同的脂肪也会影响血液健康的参数。目前已有相关试验研究奶牛补饲不同脂肪对血液脂肪

酸组成及血液生理生化指标的影响,但是关于奶牛饲喂不同脂肪酸混合物对血液抗氧化性能的影响研究较少。本试验以中国黑白花荷斯坦奶牛作为试验材料,研究奶牛补饲不同脂肪酸混合物对血液脂肪酸组成及抗氧化性能的影响,旨在为奶牛生产中科学使用脂肪酸提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与基础日粮

2010-11-07—2011-01-02 在北京大兴区沧达福牧场进行饲养试验。奶牛补饲的中短链脂肪酸由正己酸(C6:0-6.0%)、正辛酸(C8:0-4.0%)、正癸酸(C10:0-9.0%)、月桂酸(C12:0-10.0%)、肉豆蔻酸(C14:0-32%)和棕榈酸(C16:0-39%)配制,以上产品均购于南京冠华贸易有限公司。长链脂肪酸(59%可可脂、16%橄榄油和25%棕榈油)由可可脂(江苏林芝山阳集团有限公司)、橄榄油(北京世纪康鑫有限公司)和棕榈油(广州益海粮油有限公司)配制。

本次饲养试验所需要的36头中国黑白花荷斯坦奶牛均由北京大兴沧达福有限公司提供。试验基础日粮根据中国农业行业推荐标准2004年版奶牛营养需要配制^[9],日粮精粗质量比为50:50,日粮组成及营养成分见表1。

表1 基础日粮组成和营养水平(干物质基础)

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

日粮组成	$w/\%$	日粮组成	$w/\%$	营养水平	含量
苜蓿干草	10.79	葵花籽粕	1.20	净能 [®] /(MJ/kg)	6.19
羊草	10.79	酵母	5.29	w (粗蛋白质)/%	16.07
玉米青贮	21.77	苏打	1.08	w (中性洗涤纤维)/%	39.78
酒糟	5.52	磷酸氢钙	0.48	w (酸性洗涤纤维)/%	22.39
糖蜜豆皮	1.20	石粉	0.84	w (粗脂肪)/%	3.52

续表

日粮组成	w/%	日粮组成	w/%	营养水平	含量
玉米	23.34	食盐	0.60	w(钙)/%	0.90
麦麸	5.29	轻质碳酸钙	0.48	w(磷)/%	0.42
豆粕	7.34	氧化镁	0.12		
棉粕	1.68	预混料 ^①	0.48		
菜粕	1.68				

注：①每 kg 预混料中含(DM):VA 250 kIU、VD 65 kIU、VE 2 100 IU、Fe 400 mg、Cu 540 mg、Zn 2 100 mg、Mn 560 mg、Se 15 mg、I 35 mg 和 Co 68 mg。②泌乳净能为计算值,其他日粮养分指标均为实测值。

1.2 试验设计与饲养管理

试验选用 36 头经产、健康状况良好、处于泌乳中期((183±46)DIM)的中国黑白花荷斯坦奶牛,按泌乳日龄、胎次和产奶量随机分成 3 个处理组,每组 12 头奶牛。3 个处理组分别为对照组(CK)、中短链脂肪酸组(SMCFA)和长链脂肪酸组(LCFA)。CK 组奶牛只采食全混合日粮(TMR)。SMCFA 组奶牛在采食 TMR 的基础上,每头奶牛补饲 400 g/d 中短链脂肪酸,同样 LCFA 组奶牛也在采食 TMR 的基础上,每头奶牛补饲 400 g/d 长链脂肪酸。奶牛补饲的脂肪酸混合物具体脂肪酸组成见表 2。试验期为 9 周,其中第 1 周为预饲期,后 8 周为正饲期。

表 2 不同脂肪酸混合物的脂肪酸组成

Table 2 Fatty acids composition of different fatty acid mixture g/100g

成分	处理		
	CK	LCFA	SMCFA
C4:0	0	0	0
C6:0	0	0	6.54
C8:0	0	0	4.01
C10:0	0	0	9.07
C12:0	0	0	10.60
C14:0	0	0	30.71
C16:0	0	28.91	38.66
C16:1	0	0.22	0
C17:0	0	0.18	0
C18:0	0	22.73	0
C9-C18:1	0	39.48	0
C11-C18:1	0	0.04	0
C9C12-C18:2	0	6.09	0
C18:3	0	0.33	0

奶牛采取半栓系半自由式饲养,每日饲喂 3 次(08:30、14:30 和 20:30),挤奶 3 次(08:00、14:00 和 20:00),自由饮水。每天将每头奶牛需要饲喂的 400 g 脂肪酸混合到一部分晨饲的 TMR 日粮中,等奶牛将脂肪酸采食完后,再将剩余的 TMR 日粮饲喂奶牛,待奶牛采食完后(剩料量应不多于 5%),放开奶牛让其自由活动。

1.3 样品采集与分析方法

正式试验期间每 2 周采集 1 次尾动脉血液样品,每组随机挑选出 6 头奶牛。采血管为 9 mL 的 VACUETIE 真空配套采血装置。每头奶牛共采集 2 管血样,一个为血浆管,另一个为血清管,静置至自然凝固。血清管和血浆管在 4 ℃、转速在 3 000g 条件下离心 15 min,然后将上层液分别转移至 1.5 mL 离心管中,储存在 -20 ℃ 条件下冷冻保存。其中血浆管用于测定血浆中脂肪酸组成,血清管用于测定血清中超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, CAT)和过氧化氢酶(catalase, CAT)活性,并测定血清中脂质过氧化物的产物丙二醛(malondialdehyde, MDA)的含量。

血浆中脂肪酸的具体测定方法参照 Bu 等^[10]的脂肪酸分析方法。血清中 SOD、GSH-Px 和 CAT 的活性以及 MDA 的含量均采用分光光度法测定,试剂盒均购于南京建成生物工程研究所。具体测定方法参照试剂盒说明书,检测过程中使用的仪器为日本日立 7160 全自动生化分析仪。

1.4 统计与分析

试验原始数据先用 Excel 2003 软件进行初步整理,然后采用 SAS 9.0 统计软件中的 PROC MIXED 进行单因素方差分析,显著性水平为 $P < 0.05$,采用 Tukey 方法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 日粮添加不同脂肪酸混合物对血浆脂肪酸组成的影响

从表 3 可见,血浆中 C16:0、c-9C18:0、t11-C18:1、c-9c-12C18:2 和 C18:3 的质量分数在 3 个处理组间差异不显著($P>0.05$),但是 SMCFA 处理组中 C14:0 含量最高,与另外 2 个处理组相比差异显著($P<0.05$)。由表 3 还可以看出,SMCFA 处理组显著提高了碳链长度小于等于 16 的脂肪酸含

量,显著降低了碳链长度大于 16 的脂肪酸含量,与其他 2 个处理组差异极显著($P<0.01$)。另外,SMCFA 处理组显著提高了血浆中总饱和脂肪酸(saturated fatty acid,SFA)的含量($P<0.05$),显著降低了血浆中 UFA 的含量($P<0.05$),同时也显著提高了 SFA 与 UFA 的比值($P<0.05$)。此外,SMCFA 处理组降低了血浆中 PUFA 的含量,但是没有达到显著水平($P>0.05$)。各处理组血浆中 MUFA(monounsaturated fatty acid,MUFA)含量差异不显著($P>0.05$)。LCFA 处理组对血液中各

表 3 不同脂肪酸混合物对血液脂肪酸组成的影响

Table 3 Effect of different fatty acids mixture on plasma fatty acid composition

成分	处理			SEM	P
	CK	LCFA	SMCFA		
C14:0	0.83 b	0.96 b	2.20 a	0.27	<0.01
C16:0	9.69	10.01	10.68	0.33	0.12
C18:0	10.93	11.14	9.84	0.47	0.13
C9-C18:1	6.49	7.26	6.69	0.27	0.15
T11-C18:1	0.37	0.37	0.33	0.03	0.38
c9c12-C18:2	56.59	55.36	53.79	0.92	0.11
C18:3	3.70	3.80	4.02	0.11	0.14
≤C16	12.13 c	12.91 bc	14.86 a	0.36	<0.01
>C16	87.94 a	87.09 a	85.14 b	0.53	<0.01
MUFA	8.29	9.46	8.74	0.50	0.10
SFA	26.42 b	26.54 b	28.84 a	1.09	0.05
PUFA	65.39	64.01	62.41	0.97	0.12
UFA	73.63 a	73.46 a	71.14 b	0.76	0.05
SFA/UFA	0.36 b	0.36 b	0.41 a	0.01	0.05

注:同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

种脂肪酸含量没有显著的影响。

2.2 日粮添加不同脂肪酸混合物对血液抗氧化指标及脂质过氧化物产物的影响

日粮添加不同脂肪酸混合物对奶牛血液各项抗氧化指标和脂质过氧化物产物 MDA 的影响见表 4。由表可知,LCFA 处理组与 CK 组相比,血清中 GSH-Px 和 CAT 活性均表现有升高趋势,但是只有 GSH-Px 达到了显著水平($P<0.05$)。而 SOD 活

性有降低趋势,但没有达到显著水平($P>0.05$)。另外,SMCFA 处理组血清中的 GSH-Px 和 CAT 活性也均比 CK 组的要高($P<0.05$)。此外,SMCFA 处理组血清中 SOD、GSH-Px 和 CAT 的活性均要高于 LCFA 处理组。

从表 4 还可以发现,血清中脂质过氧化物 MDA 含量在 LCFA 处理组中最高,与另外 2 个处理组相比差异显著($P<0.05$),而 MDA 在 SMCFA

中含量则最低。

表 4 不同脂肪酸混合物对奶牛血液中抗氧化指标的影响

Table 4 Effect of different fatty acids mixture on the enzymatic radical scavenging systems in serum u/mL

指标	处理			SEM	P
	CK	LCFA	SMCFA		
SOD	47.87	43.96	46.55	1.70	0.34
GSH-Px	784.36 b	825.97 a	833.77 a	12.55	0.02
CAT	51.61 b	52.15 b	57.36 a	1.33	0.01
MDA	1.53 bc	2.12 a	1.36 c	0.12	0.01

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($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同脂肪酸混合物对血浆脂肪酸组成的影响

早期资料显示,牛奶乳脂中的脂肪酸主要来源于 2 个部分,约 45% 的中短链脂肪酸(C4~C14, 50% 的 C16:0)来源于瘤胃发酵产物乙酸、 β -羟丁酸等在乳腺内的从头合成,其余主要来自乳腺从血液中摄取的长链脂肪酸(50% 的 C16:0 和所有的 18 碳脂肪酸)^[11],而血浆中的长链脂肪酸主要来源于日粮^[12]。可见,血液在日粮脂肪酸向乳脂脂肪酸,特别是乳脂中长链脂肪酸的转变过程中起到了重要的作用,是联通日粮脂肪酸和乳脂脂肪酸的枢纽和通道。本试验发现,奶牛日粮中添加中短链脂肪酸与添加长链脂肪酸相比可以显著降低碳链长度大于 16 的长链脂肪酸含量,显著提高碳链长度小于等于 16 的中短链脂肪酸含量;日粮中添加中短链脂肪酸与 CK 组相比可以显著提高碳链长度小于等于 16 的中短链脂肪酸含量,显著降低碳链长度大于 16 的长链脂肪酸含量,这一结果与 Enjalbert 等^[13]的研究结果类似。同时本次研究得出,与对照组相比,LCFA 处理组对血浆中 SFA 的含量没有显著的影响,这一结果与 Liu 等^[14]的结果一致。另外,刘仕军等^[15]通过给奶牛补充富含长链脂肪酸的植物油,结果显示,植物油组与对照组血浆中 MUFA、PUFA 含量差异不显著,Romo 等^[16]和 Gonthier 等^[17]的研究也有类似的报道,这与本次试验所得到的结果相同。

日粮中的脂类物质进入瘤胃后首先经过瘤胃微生物的脂质代谢和生物氢化作用,然后在瘤胃后肠道被上皮细胞吸收进入血液。在本次饲喂试验中,奶牛补饲的长链脂肪酸中富含各种 UFA 如 C18:1 和 C18:2,但各处理组血浆中 C18:1 和 C18:2 的含量差异不显著,只是有很小的变化,这可能与瘤胃是一个高度的厌氧环境有关,导致奶牛采食的 UFA 进入瘤胃后发生氢化作用,从而使 UFA 氢化为 SFA^[18],或者一部分顺式 C18:1 通过异构化作用形成反式 C18:1^[19]。Kemp 等^[20]的“脱毒”理论则能更好的解释各处理组血浆中 C18:1 和 C18:2 的含量差异不明显的原因,认为 UFA(C18:1、C18:2 和 C18:3)对瘤胃微生物来说具有“毒性”,会影响瘤胃微生物的生长及繁殖,所以瘤胃微生物通过生物氢化作用来保护自己,使得进入瘤胃后肠道中的脂肪酸和所采食的脂肪酸组成有显著的不同,结果导致各处理组进入血液中的各种 UFA 含量差异不明显。

3.2 不同脂肪酸混合物对血液抗氧化性能的影响

血液的抗氧化性能受到血清中抗氧化酶系活性以及脂质过氧化物产物含量高低的影响。研究表明,抗氧化酶系具有有效清除机体或组织内具有氧化作用的自由基和具有毒害作用的脂质过氧化物产物的功能^[21-22]。血液中也存在有天然的抗氧化酶,主要有 SOD、GSH-Px 和 CAT。其中 SOD 是清除机体有害自由基的第一道防线,首先 SOD 将有害的超氧自由基催化为氢过氧化物,然后 GSH-Px 和 CAT 会接着将有害的氢过氧化物立即水解为完全无害的水和氧气^[23],它们组成了一条有效的防氧链条。Barrefors 等^[24]认为,脂类发生自发氧化是由多种因素共同作用的结果,而不仅是某一单一因素造成的。并且认为,UFA 尤其是 PUFA 是影响脂类发生自发氧化的重要因素。PUFA 含量升高时会导致自由基的产生几率增加,从而提高了脂类发生自发氧化的可能性^[25-26]。

通常认为,动物饲喂含长链不饱和脂肪酸,尤其是含 PUFA 较高的日粮时,会导致机体抗氧化性能的改变,补偿性诱导动物内源抗氧化酶活性的增加,以应对氧化应激^[27-28]。本次研究发现,奶牛日粮中添加长链脂肪酸能够促进一些抗氧化酶活性的增加。如与 CK 组相比,LCFA 处理组血清中的 GSH-

Px 和 CAT 活性均有不同程度的增加。从表 3 可以发现,LCFA 处理组血浆中 PUFA 和 CK 组差异不显著,而 LCFA 处理组血清中脂质过氧化物产物 MDA 含量却有所增加。可能原因是 LCFA 处理组血清中 SOD 活性比 CK 组低。因为 SOD 是清除有害自由基的第一道防线^[23],所以即使 GSH-Px 和 CAT 活性有所增加,但却不能降低血液中脂质自发氧化的发生,从而导致脂质过氧化物产物 MDA 含量增加。但是关于 LCFA 处理组血清中 SOD 活性为什么会下降不能给出确切的解释,因为 SOD 的活性会受到很多因素的影响,如日粮 PUFA、抗氧化剂(生育酚类等)、金属离子(铜、锌等)含量等都会影响其活性,所以关于这方面的研究仍有待于进一步的深入。另外本次研究还发现,SMCFA 处理组血清中的 GSH-Px 和 CAT 活性与 CK 组相比也有升高的趋势,而 SOD 活性和 CK 组差异不显著。并且作为形成自由基的底物—PUFA 含量也要低于 CK 组,所以 SMCFA 处理组血清中 MDA 含量最低。由于中短链脂肪酸对奶牛机体的氧化应激作用没有长链脂肪酸高,所以关于 GSH-Px 和 CAT 活性出现升高的现象也不能给出确切的解释,这需要今后更深水平的研究。

4 结 论

本试验对奶牛日粮添加不同脂肪酸混合物对泌乳奶牛血液脂肪酸组成及抗氧化性能的影响进行了相关研究,得出以下结论:

1) 日粮中添加中短链脂肪酸可以提高血液的抗氧化性能,但是会提高血浆中碳链小于等于 16 的脂肪酸、提高血浆中 SFA 的含量,可能会增加奶牛疾病的发生。同时也会间接影响乳脂肪酸组成,降低牛奶品质。

2) 日粮中添加长链脂肪酸对血液中各种脂肪酸含量没有显著的影响,但会降低血液的抗氧化性能,提高血液有害脂质过氧化物产物 MDA 的含量,从而也可能会危害奶牛机体的健康。

参 考 文 献

[1] 卜登攀,王加启,Dhiman T R,等.植物油来源亚油酸和亚麻酸对乳脂 CLA 合成的影响[J].畜牧兽医学报,2007,38(7):663-671

[2] Kadegowda A K G,Piperova L S,Delmonte P, et al. Abomasal infusion of butterfat increases milk fat in lactating dairy cows [J]. J Dairy Sci,2008,91:2370-2379

[3] Khas-Erdene,Wang J Q,Bu D P, et al. Short communication: Responses to increasing amounts of free α -linolenic acid infused into the duodenum of lactating dairy cows [J]. J Dairy Sci, 2010,93(4):1677-1684

[4] Mosley S A, Mosley E E, Hatch B, et al. Effect of varying levels of fatty acids from palm oil on feed intake and milk production in Holstein cows [J]. J Dairy Sci,2007,90(20):987-993

[5] Odongo N E, Or-Rashid M M, Kebreab E, et al. Effect of supplementing myristic acid in dairy cow rations on ruminal methanogenesis and fatty acid profile in milk [J]. J Dairy Sci, 2007,90(4):1851-1858

[6] Wartjes J L, Robinson P H, Galo E, et al. Effects of feeding supplemental palmitic acid (C16:0) on performance and milk fatty acid profile of lactating dairy cows under summer heat [J]. Anim Feed Sci Technol,2008,140:241-257

[7] 王宗元. 动物营养代谢病和中毒病学[M]. 北京:中国农业出版社,1998

[8] Frankel E N. Lipid oxidation: Mechanisms, products and biological significance [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society,1984,61(12):1908-1917

[9] 中华人民共和国农业部. NY/T 34. 中华人民共和国农业行业标准. 奶牛饲养标准[S]. 北京:中国农业出版社,2004

[10] Bu D P, Wang J Q, Dhiman T R, et al. Effectiveness of oils rich in linoleic and linolenic acids to Enhance conjugated linoleic acid in milk from dairy cows [J]. J Dairy Sci,2007,90:998-1007

[11] Bauman D E, Mater I H, Wall R J, et al. Major advances associated with the biosynthesis of milk [J]. J Dairy Sci,2006, 89:1235-1243

[12] Palmquist D L, Jenkins T C. Fat in lactation rations: Review [J]. J Dairy Sci,1980,63:1-14

[13] Enjalbert F, Marie-Claude Nicot, Bayourthe C, et al. Duodenal infusions of palmitic, stearic or oleic acids differently affect mammary gland metabolism of fatty acids in lactating dairy cows [J]. J Nutr,1998,128(9):1525-1532

[14] Liu Z L, Yang D P, Chen P, et al. Effect of dietary sources of roasted oilseeds on blood parameters and milk fatty acid composition [J]. Czech J Anim Sci,2008,53(5):219-226

[15] 刘仕军,王加启,卜登攀. 日粮补充植物油籽对奶牛血液脂肪酸及生化指标的影响 [J]. 中国奶牛,2007,12:9-12

[16] Romo G A, Erdman R A, Teter B B, et al. Milk composition and apparent digestibilities of dietary fatty acids in lactating dairy cows abomasally infused with cis or trans fatty acids [J]. J Dairy Sci,2000,83:2609-2619

[17] Gonthier C, Mustafa A F, Ouellet D R, et al. Feeding micronized and extruded flaxseed to dairy cows: effects on blood parameters and milk fatty acid composition [J]. J Dairy Sci,2005,88:748-756

- [18] Shorland B D, Legay-Carmier F. The Biohydrogenation of feed fatty acids in rumen[J]. *Nature*, 1955, 175: 1129-1130
- [19] Jenkins T C, AbuGhazaleh A A, Freeman S, et al. The production of 10-hydroxystearic acid and 10-ketostearic acids is an alternate route of oleic acid transformation by the ruminal microbiota in cattle[J]. *J Nutr*, 2006, 136: 926-931
- [20] Kemp P, Lander D J. Hydrogenation in vitro of alpha-linoleic acid to stearic acid by mixed cultures of pure strains of rumen bacteria[J]. *J Genetic Micro*, 1984, 130: 527-527
- [21] Halliwell B, Murcia M A, Chirico S, et al. Free radicals and antioxidants in food and *in vivo*: What they do and how they work[J]. *Critical Rev Food Sci Nutr*, 1995, 35: 7-20
- [22] Vanderlelie J, Venardos V L, Clifton V L, et al. Increased biological oxidation and reduced anti-oxidant enzyme activity in pre-eclamptic placentae[J]. *Placenta*, 2005, 26: 53-58
- [23] Michiels C, Raes M, Toussaint O, et al. Importance of Se-glutathione peroxidase, catalase, and Cu/Zn-SOD for cell survival against oxidative stress[J]. *Free Radic Biol Med*, 1994, 17: 235-248
- [24] Barrefors P, Granelli K, Appelquist L, et al. Chemical characterization of raw milk samples with and without oxidative off flavor[J]. *J Dairy Sci*, 1995, 78: 2691-2699
- [25] Timmons J S, Weiss W P, Palmquist D L, et al. Relationships among dietary roasted soybeans, milk components, and spontaneous oxidized flavor of milk[J]. *J Dairy Sci*, 2001, 84 (11): 2440-2449
- [26] Huang R, Choe E, Min D B. Kinetics for singlet oxygen formation by riboflavin photosensitization and the reaction between riboflavin and singlet oxygen[J]. *Food Chem Toxicol*, 2004, 69: 726-732
- [27] Venkatraman J T, Pinnavaia L. Effects of saturated, n-6 and n-3 lipids on activities of enzymes involved in antioxidant defense in normal rats[J]. *Nutr Res*, 1998, 18: 341-350
- [28] Renerre M, Poncet K, Mercier Y, et al. Influence of dietary fat and vitamin E on antioxidant status of muscles of turkey[J]. *J Agri Food Chem*, 1999, 47: 237-244

(责任编辑: 苏燕)