

饲料添加 *L*-肉碱对生长育肥母猪生长性能、胴体品质和肉品质的影响

古长松^{1,2} 李彬^{1,2} 胡声迪³ 黄李蓉^{1,2} 曾子悠^{1,2} 朱正鹏^{1,2*}

(1.四川特瑞美生物科技有限公司,成都 610000;2.四川特驱农牧科技集团有限公司,成都 610207;

3.新希望六和股份有限公司,成都 610000)

摘要: 本试验旨在研究饲料添加 *L*-肉碱对生长育肥母猪生长性能、胴体品质和肉品质的影响。选取体重[(30.42±3.24) kg]相近的 PIC 商品母猪 420 头,随机分为 2 组,每组 7 个重复,每个重复 30 头。对照组饲喂基础饲料,试验组在基础饲料的基础上添加 100 mg/kg *L*-肉碱。试验期共计 105 d。结果表明:1)与对照组相比,试验组生长育肥母猪各阶段平均日增重、平均日采食量、料重比和存活率均无显著差异($P>0.05$)。2)与对照组相比,饲料添加 *L*-肉碱显著提高生长育肥母猪背膘厚度、背最长肌长度和重量($P<0.05$),显著降低下颌脂肪指数($P<0.05$),显著降低背最长肌剪切力、滴水损失、肌纤维直径和面积($P<0.05$),显著提高背最长肌肌纤维密度($P<0.05$)。3)与对照组相比,饲料添加 *L*-肉碱提高生长育肥母猪背最长肌肌内脂肪含量($P<0.05$),但显著降低背最长肌亚油酸、花生酸和花生三烯酸含量($P<0.05$)。4)与对照组相比,饲料添加 *L*-肉碱显著提高生长育肥母猪背最长肌脂肪酰合成酶(*FAS*) mRNA 相对表达量($P<0.05$),显著降低背最长肌肌球蛋白重链 II b(*MyHC II b*) mRNA 相对表达量($P<0.05$)。综上所述,饲料添加 100 mg/kg *L*-肉碱对生长育肥母猪生长性能无显著影响,但可以影响背最长肌肌内脂肪沉积和肌纤维性状,并改善胴体品质和肉品质。

关键词: *L*-肉碱;生长育肥母猪;胴体品质;肌纤维;肉品质

中图分类号:S816.7

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2021)04-1964-12

随着人们对肉类食品从数量需求逐步向品质需求转变,运用营养学方法改善肉品质成为当前研究热点。大量研究表明,可以通过营养素及某些活性物质促进肉质相关功能基因的表达、调节机体内肌肉和脂肪的含量和比例,以此提高胴体品质和肉品质^[1-3]。*L*-肉碱(学名 *L*-β-羟基-γ-三甲胺丁酸)作为一种参与动物体内脂肪酸代谢的类维生素营养素,可通过载体功能将长链脂肪酸从线粒体膜外输送到膜内,促进脂肪酸的 β-氧化。国内外相关研究已经初步揭示 *L*-肉碱具有降低脂肪沉积和提高蛋白质沉积等作用。Owen

等^[4-5]在生长育肥猪饲料中添加不同水平的 *L*-肉碱,发现能够增加猪背最长肌面积,降低背膘厚度,且当 *L*-肉碱添加水平为 50 mg/kg 时胴体品质最佳; Rincker 等^[6]研究发现,饲料添加 50 ~ 100 mg/kg *L*-肉碱可以改善断奶仔猪的生长性能; Owen 等^[7-8]研究表明,在仔猪和育肥猪饲料中添加 *L*-肉碱可以抑制肝脏线粒体支链 α-酮酸脱氢酶的活性,提高棕榈酸氧化速率和丙酮酸羧化酶的活性,从而将碳源转移到支链氨基酸合成途径,利于蛋白质合成。但目前关于 *L*-肉碱改善生长育肥母猪肉品质和胴体品质的报道较少。因

收稿日期:2020-09-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0500402);四川省国际科技创新合作项目(2018HH0160);成都市顶尖创新团队项目;成都市武侯区“诸葛精英计划”

作者简介:古长松(1993—),男,重庆人,硕士,从事动物营养研究。E-mail: guchangsong@foxmail.com

* 通信作者:朱正鹏,高级工程师,E-mail: zhuzp1980@foxmail.com

此,为了探讨 L-肉碱对生长育肥猪胴体及肉品质的影响及可能机制,本试验以生长育肥母猪为研究对象,研究 L-肉碱对生长育肥母猪生长性能、胴体品质、肉品质、相关基因表达以及肌纤维性状的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料和饲料

本试验所用 L-肉碱来源于瑞士某集团(纯度 $\geq 99\%$)。按照 NRC(2012) 生长育肥猪的营养需要配制试验各阶段饲料,基础饲料组成及营养

水平见表 1。

1.2 试验设计

本试验采用单因素随机区组设计,选取 420 头体重 $[(30.42 \pm 3.24) \text{ kg}]$ 相近的 PIC 生长期母猪,随机分为 2 组,每组 7 个重复,每个重复 30 头小母猪,各组初始体重无显著差异($P > 0.05$)。试验分为 30~50 kg、51~75 kg、76~100 kg 和 101~120 kg 4 个阶段,试验期共计 105 d。对照组饲喂基础饲料,试验组在基础饲料中添加 100 mg/kg L-肉碱。

表 1 基础饲料组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of basal diets (air-dry basis)

%

项目 Items	体重阶段 Weight stage/kg			
	30~50	51~75	76~100	101~120
原料 Ingredients				
玉米 Corn	72.50	73.30	74.20	75.00
麸皮 Wheat bran	4.40	6.89	9.35	11.84
豆粕 Soybean meal	18.80	15.90	12.90	9.99
石粉 Limestone	1.09	1.09	1.10	1.10
食盐 NaCl	0.22	0.20	0.17	0.14
磷酸氢钙 CaHPO_4	1.05	0.83	0.62	0.41
矿物质预混料 Mineral premix ¹⁾	0.36	0.36	0.36	0.36
维生素预混料 Vitamin premix ²⁾	0.20	0.20	0.20	0.20
L-赖氨酸盐酸盐 L-lysine · HCl	0.86	0.79	0.72	0.66
L-苏氨酸 L-threonine	0.26	0.22	0.18	0.13
DL-蛋氨酸 DL-methionine	0.05	0.05	0.05	0.05
L-缬氨酸 L-valine	0.04	0.04	0.04	0.04
L-色氨酸 L-tryptophan	0.11	0.08	0.06	0.04
氯化胆碱 Choline chloride	0.05	0.04	0.04	0.03
植酸酶 Phytase	0.01	0.01	0.01	0.01
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ³⁾				
代谢能 ME/(MJ/kg)	13.50	13.43	13.36	13.28
粗蛋白质 CP	16.00	15.00	14.00	13.00
钙 Ca	0.70	0.65	0.60	0.55
总磷 TP	0.50	0.48	0.46	0.44
赖氨酸 Lys	1.10	1.00	0.90	0.80
蛋氨酸 Met	0.48	0.42	0.37	0.32
苏氨酸 Thr	0.68	0.62	0.56	0.50

1) 矿物质预混料为每千克饲料提供 The mineral premix provided the following per kg of diets: Fe ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 110 mg, Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 80 mg, Mn ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 60 mg, Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 20 mg, I (KI) 0.65 mg, Se (NaSe_2O_3) 0.30 mg。

2) 维生素预混料为每千克饲料提供 The vitamin premix provided the following per kg of diets: VA 15 000 IU, VD₃ 5 000 IU, VE 60 IU, VK₃ 2.5 IU, VB₁ 3.5 mg, VB₂ 5.5 mg, VB₆ 27.6 μg, 烟酸 niacin 30 mg, 胆碱 choline 500 mg。

3) 营养水平均为计算值。Nutrient levels were all calculated values.

1.3 饲养管理

本试验在广元市研发猪场进行。试验开始前对猪舍进行彻底清洁,使用高锰酸钾熏蒸消毒,并对料槽、水线进行彻底清洗及消毒。试验开始前使用基础饲料预饲3 d,试验期各处理猪只自由饮水和采食,并保持各组饲养管理条件与温湿度一致。猪只免疫程序按猪场常规程序进行。

1.4 测定指标和方法

1.4.1 生长性能

每阶段准确记录各组试验猪的投料量和余料量,计算平均日采食量(average daily feed intake, ADFI);各阶段开始、结束时以重复为单位空腹称重,记录初重(initial body weight, IBW)、末重(final body weight, FBW),并计算平均日增重(average daily gain, ADG);根据 ADFI 和 ADG 计算料重比(F/G);记录各阶段猪只死亡情况,并计算存活率。

1.4.2 胴体品质

动物试验结束后,各重复选取1头与该组均重相近的母猪,按 NY/T 825—2004《瘦肉型猪胴体性状测定技术规范》方法进行屠宰分割,测定并计算屠宰率、胴体斜长、胴体直长、背最长肌长度、背最长肌重量、眼肌面积和背膘厚度。准确分离板油及下颌脂肪并称量,计算板油和下颌脂肪指数:

$$\text{脂肪指数 (g/kg)} = \frac{\text{脂肪组织重量 (g)}}{\text{活体重量 (kg)}}$$

1.4.3 肉质

屠宰后采集左侧胴体背最长肌肌肉样品,按照 NY/T 821—2004《猪肌肉品质测定技术规范》方法进行肉质评定,测定并计算背最长肌常规指标、肌肉脂肪、熟肉率、滴水损失、大理石纹评分、pH(pH_{45 min}和 pH_{24 h})(Russell CD700,德国)、肉色(Konica-Minolta Sensing CR410,日本);取第10根肋骨处背最长肌约100 g,称重记录后,放入密闭塑料样品袋内,80℃水浴加热15 min,取出肉样用滤纸擦拭表面水分后称重,计算熟肉率;按照 NY/T 1180—2006《肉嫩度的测定 剪切力测定法》方法测定剪切力。

1.4.4 长链脂肪酸含量

取0.2 g背最长肌肌肉样品,参照 GB/T 9695.2—2008《肉与肉制品脂肪酸测定》方法,采

用气相色谱仪(安捷伦 GC-6890,德国)测定并计算肌肉样品中长链脂肪酸组成及含量。

1.4.5 肌纤维组织学测定

按照 Zhang 等^[9]描述的试验方法,用-27℃冷冻切片仪(Leica CM1900,德国)对背最长肌样品进行切片处理。切片用烟酰胺腺嘌呤二核苷酸四唑氧化还原酶(NADH-TR)染色^[10]。将染色切片在装有 NIS-Elements F3.00 成像软件的显微镜(40×)下观察拍照,用 Image-Pro Plus 图像分析软件(Media Cybernetics,美国)对肌纤维的直径、密度和面积进行计算和分析。

1.4.6 基因表达

屠宰后立即采集第13根肋骨的背最长肌5 g,液氮中速冻后,置于-80℃超低温冰箱中保存。参考 Mao 等^[11]RNA 分离和实时定量 PCR 方法,使用 Trizol 试剂(TaKaRa,中国)提取样品总 RNA,采用超微量分光光度计(NanoDrop™ 2000, Thermo Scientific™,美国)测定 RNA 浓度。使用 iScript™ cDNA Synthesis Kit(Bio-Rad,美国)试剂盒合成 cDNA,利用 SYBR-Green-Supremix 进行实时荧光定量 PCR(qRT-PCR)分析,引物序列见表2。根据 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 法计算目的基因的 mRNA 相对表达量^[12]。

1.5 数据统计与分析

试验数据使用 Excel 2019 进行初步计算处理与整理,采用 SAS 9.2 进行 student *t*-test 分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $0.05 \leq P < 0.10$ 表示有变化趋势。

2 结果与分析

2.1 L-肉碱对生长育肥母猪生长性能的影响

由表3可知,与对照组相比,饲料添加100 mg/kg L-肉碱对生长育肥母猪各阶段的 ADFI、ADG、F/G 和存活率均无显著影响($P > 0.05$)。

2.2 L-肉碱对生长育肥母猪胴体品质的影响

由表4可知,与对照组相比,饲料添加100 mg/kg L-肉碱显著提高生长育肥母猪背最长肌长度、背最长肌重量和背膘厚度($P < 0.05$),显著降低下颌脂肪指数($P < 0.05$),但对生长育肥母猪终末体重、屠宰率、胴体斜长、胴体直长、眼肌面积以及板油脂肪指数无显著影响($P > 0.05$)。

表 2 实时荧光定量 PCR 引物序列
Table 2 Primer sequences of qRT-PCR

基因 Genes	引物序列 Primer sequences (5'—3')	退火温度 Annealing temperature/°C
肌球蛋白重链 I <i>MyHC I</i>	F: AAGGGCTTGAACGAGGAGTAGA R: TTATTCTGCTTCTCCAAAGGG	58.5
肌球蛋白重链 II a <i>MyHC II a</i>	F: CTCTGAGTTCAGCAGCCATGA R: GATGTCTTGGCATCAAAGGGC	58.5
肌球蛋白重链 II b <i>MyHC II b</i>	F: GGTACATCTAGTGCCCTGCT R: GCCTCAATGCGCTCCTTTTC	58.5
肌球蛋白重链 II x <i>MyHC II x</i>	F: TTGACTGGGCTGCCATCAAT R: GCCTCAATGCGCTCCTTTTC	58.5
脂肪酸合成酶 <i>FAS</i>	F: CTACGAGGCCATTGTGGACG R: AGCCTATCATGCTGTAGCCC	57.2
乙酰辅酶 A 羧化酶 <i>ACC</i>	F: AGCAAGGTTCGAGACCGAAAG R: TAAGACCACCGCGGATAGA	58.0
过氧化物酶体增殖物激活受体 γ <i>PPARγ</i>	F: CCAGCATTTCCTCCACACTA R: GACACAGGCTCCACTTTGATG	56.5
肉碱棕榈酰转移酶 1 <i>CPT1</i>	F: GACAAGTCCTTCACCCTCATCGC R: GGGTTTGGTTTGCCAGACAG	56.5
过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 辅激活因子-1 α <i>PGC-1α</i>	F: CACCAGCCAACACTCAGCTA R: GAGGTGCACTTGTCTCTGCT	59.0
脂蛋白脂酶 <i>LPL</i>	F: CACATTCACCAGAGGGTC R: TCATGGGAGCACTTCACG	59.0

表 3 L-肉碱对生长育肥母猪生长性能的影响

Table 3 Effects of L-carnitine on growth performance of growing-finishing female pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	P 值 P-value
30~50 kg				
初始体重 Initial weight/kg	30.41	30.43	3.24	1.000
平均日采食量 ADFI/(g/d)	1 368	1 400	42	0.509
平均日增重 ADG/(g/d)	710	737	23	0.205
料重比 F/G	1.95	1.91	0.03	0.697
存活率 Livability/%	99.05	99.05	1.23	0.970
51~75 kg				
初始体重 Initial weight/kg	53.92	54.72	5.05	0.900
平均日采食量 ADFI/(g/d)	2 162	2 152	90	0.917
平均日增重 ADG/(g/d)	840	821	31	0.501
料重比 F/G	2.57	2.62	0.07	0.715
存活率 Livability/%	98.57	99.05	2.01	0.870
76~100 kg				
初始体重 Initial weight/kg	78.31	78.51	1.85	0.980
平均日采食量 ADFI/(g/d)	2 501	2 589	43	0.201
平均日增重 ADG/(g/d)	805	811	14	0.101
料重比 F/G	3.12	3.19	0.12	0.235

续表 3

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
存活率 Livability/%	98.09	98.57	1.09	0.759
101~120 kg				
初始体重 Initial weight/kg	97.71	97.33	1.90	0.901
平均日采食量 ADFI/(g/d)	2 851	2 906	101	0.190
平均日增重 ADG/(g/d)	894	909	28	0.301
料重比 F/G	3.19	3.20	0.11	0.506
存活率 Livability/%	97.60	98.09	0.21	0.901

同行数据肩标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下表同。

Values in the same row with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same as below.

表 4 *L*-肉碱对生长育肥母猪胴体品质的影响Table 4 Effects of *L*-carnitine on carcass quality of growing-finishing female pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
终末体重 Final weight/kg	117.70	117.50	0.52	0.763
屠宰率 Dressing percentage/%	70.06	71.10	2.07	0.492
胴体斜长 Carcass dip length/cm	88.61	89.43	1.05	0.540
胴体直长 Carcass length/cm	84.79	85.64	0.27	0.613
背最长肌长度 <i>Longissimus dorsi</i> length/cm	56.07 ^a	64.14 ^b	1.87	0.031
背最长肌重量 <i>Longissimus dorsi</i> weight/kg	3.00 ^a	3.50 ^b	0.15	0.019
眼肌面积 Eye muscle area/cm ²	58.14	53.34	2.17	0.219
背膘厚度 Backfat thickness/mm	10.33 ^a	11.50 ^b	0.11	0.042
板油脂肪指数 Suet fat index/(g/kg)	11.08	11.22	0.68	0.952
下颌脂肪指数 Mandibular fat index/(g/kg)	24.12 ^b	20.32 ^a	0.13	0.002

2.3 *L*-肉碱对生长育肥母猪肉品质的影响

由表 5 可知,与对照组相比,饲料添加 100 mg/kg *L*-肉碱可以显著降低生长育肥母猪背最长肌滴水损失和剪切力 ($P<0.05$),但对熟肉率和水分含量无显著影响 ($P>0.05$);饲料添加

100 mg/kg *L*-肉碱可以显著提高肌肉脂肪含量 ($P<0.05$),但对大理石纹评分、 $\text{pH}_{45\text{ min}}$ 、 $\text{pH}_{24\text{ h}}$ 、肉色评分和 45 min、24 h 眼肌色度均无显著影响 ($P>0.05$)。

表 5 *L*-肉碱对生长育肥母猪背最长肌肉品质的影响Table 5 Effects of *L*-carnitine on meat quality in *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
水分 Moisture/%	74.51	73.37	0.27	0.601
肌肉脂肪 Intramuscular fat/%	1.56 ^a	2.08 ^b	0.19	0.045
滴水损失 Drip loss/g	1.42 ^b	0.98 ^a	0.12	0.014
熟肉率 Cooking yield/%	85.26	85.30	0.01	0.979
剪切力 Shear force/N	34.48 ^b	25.60 ^a	1.11	0.007
大理石纹评分 Marbling score	3.43	3.07	0.21	0.150
$\text{pH}_{45\text{ min}}$	6.42	6.45	0.03	0.731

续表 5

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	P 值 P-value
pH _{24 h}	5.36	5.32	0.03	0.257
肉色评分 Color score	3.43	3.07	0.21	0.150
45 min 眼肌色度 Eye flesh color at 45 min				
亮度 L*	44.74	44.91	0.45	0.239
红度 a*	14.01	14.27	0.12	0.521
黄度 b*	2.67	2.79	0.10	0.690
24 h 眼肌色度 Eye flesh color at 24 h				
亮度 L*	51.76	51.95	0.29	0.961
红度 a*	16.77	16.51	0.30	0.781
黄度 b*	6.36	5.81	0.61	0.126

2.4 L-肉碱对生长育肥母猪背最长肌长链脂肪酸含量的影响

由表 6 可知, 与对照组相比, 饲粮添加

100 mg/kg L-肉碱显著降低生长育肥母猪背最长肌亚油酸、花生酸和花生三烯酸含量 ($P < 0.05$), 对其他长链脂肪酸含量无显著影响 ($P > 0.05$)。

表 6 L-肉碱对生长育肥母猪背最长肌脂肪酸含量的影响

Table 6 Effects of L-carnitine on contents of fatty acids in *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs %

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	P 值 P-value
肉豆蔻酸 C14:0	1.11	1.25	0.02	0.128
棕榈酸 C16:0	24.12	24.92	0.11	0.132
棕榈油酸 C16:1	2.52	2.60	0.04	0.624
十七烷酸 C17:0	0.20	0.19	0.01	0.497
硬脂酸 C18:0	14.21	14.72	0.17	0.584
油酸 C18:1n9c	35.66	37.58	0.45	0.273
亚油酸 C18:2n6c	15.53 ^b	13.65 ^a	0.34	0.041
亚麻酸 C18:3n6c	0.48	0.45	0.01	0.890
花生酸 C20:0	0.30 ^b	0.22 ^a	0.01	0.032
花生烯酸 C20:1	0.60	0.65	0.01	0.517
花生三烯酸 C20:3n6	0.38 ^b	0.29 ^a	0.02	0.041
花生四烯酸 C20:4n6	3.09	2.29	0.17	0.336

2.5 L-肉碱对生长育肥母猪背最长肌肌纤维形态的影响

由表 7 可知, 与对照组相比, 饲粮添加

100 mg/kg L-肉碱显著降低生长育肥母猪背最长肌肌纤维直径和肌纤维面积 ($P < 0.05$), 显著提高肌纤维密度 ($P < 0.05$)。

表 7 L-肉碱对生长育肥母猪背最长肌肌纤维形态的影响

Table 7 Effects of L-carnitine on myofiber morphology in *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	P 值 P-value
肌纤维直径 Myofiber diameter/ μm	71.93 ^b	68.72 ^a	1.08	0.028
肌纤维面积 Myofiber area/ μm^2	4 207.92 ^b	3 948.34 ^a	12.45	0.013
肌纤维密度 Myofiber density/(个/ mm^2)	141.97 ^a	179.34 ^b	9.55	0.044

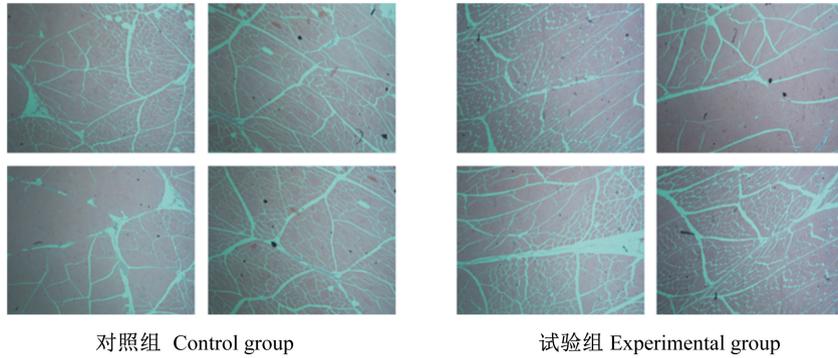


图1 生长育肥母猪背最长肌肌纤维形态

Fig.1 Myofiber morphology in *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs (40×)

2.6 L-肉碱对生长育肥母猪背最长肌相关基因表达的影响

由表 8 可知,与对照组相比,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱显著提高生长育肥母猪背最长

肌脂肪酸合成酶(*FAS*) mRNA 相对表达量($P < 0.05$),显著降低肌球蛋白重链(*MyHC*) II *b* mRNA 相对表达量($P < 0.05$),对其他基因表达无显著影响($P > 0.05$)。

表 8 L-肉碱对生长育肥母猪背最长肌相关基因表达的影响

Table 8 Effects of L-carnitine on related gene expression in *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验组 Experimental group	均值标准误 SEM	P 值 P-value
乙酰辅酶 A 羧化酶 <i>ACC</i>	1.00	0.68	0.20	0.354
肉碱棕榈酰转移酶 1 <i>CPT1</i>	1.00	0.59	0.17	0.295
脂肪酸合成酶 <i>FAS</i>	1.00 ^a	1.47 ^b	0.21	0.029
肌球蛋白重链 I <i>MyHC</i> I	1.00	2.28	0.69	0.212
肌球蛋白重链 II a <i>MyHC</i> II a	1.00	0.96	0.37	0.709
肌球蛋白重链 II b <i>MyHC</i> II b	1.00 ^b	0.79 ^a	0.19	0.046
肌球蛋白重链 II x <i>MyHC</i> II x	1.00	1.28	0.24	0.503
过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 辅激活因子-1 α <i>PGC-1α</i>	1.00	0.39	0.29	0.107
过氧化物酶体增殖物激活受体 γ <i>PPARγ</i>	1.00	1.64	0.23	0.412
脂蛋白脂酶 <i>LPL</i>	1.00	1.11	0.11	0.719

3 讨论

3.1 L-肉碱对生长育肥母猪生长性能的影响

本研究结果表明,与对照组相比,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱对生长育肥母猪各阶段生长性能均无显著影响。James 等^[13]在饲料中分别添加 25 和 50 mg/kg L-肉碱,发现其对生长育肥母猪 ADG、ADFI 和 F/G 均无显著影响,但添加 50 mg/kg L-肉碱可以显著改善阉公猪 F/G,说明饲料添加 L-肉碱对猪生长性能的影响可能存在性别差异。Owen 等^[14]研究表明,在生长育肥猪饲

粮中分别添加 25、50、75、100 和 125 mg/kg L-肉碱,对生长性能无显著影响。James 等^[15]在公母各占 1/2 的生长育肥猪饲料中添加 50 mg/kg L-肉碱,对生长育肥猪的生长性能无显著差异,与本试验结果有相同的趋势。王明鹏^[16]研究表明,饲料添加 L-肉碱可减少消耗体内赖氨酸和蛋氨酸,起到节约氨基酸的作用,从而提高饲料中氨基酸的利用率。本试验中,L-肉碱对生长性能无影响可能与性别、L-肉碱添加水平以及育肥期赖氨酸添加水平有关。

3.2 L-肉碱对生长育肥母猪胴体品质的影响

本研究结果表明,与对照组相比,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱显著增加了生长育肥母猪背最长肌长度和重量。Owen 等^[4]在 23~104 kg 体重阶段的猪饲料中添加 25 mg/kg L-肉碱,结果发现背最长肌面积显著提高。Bonomi^[17]向育肥猪饲料中分别添加 100、200 和 300 mg/kg DL-肉碱,与未添加组相比,育肥猪的大腿肉重量分别提高 7.00%、8.00% 和 13.55%;前腿肉重量分别提高 11.54%、12.97% 和 20.77%。L-肉碱可以提高肌肉蛋白质的沉积量,这可能是由于动物体内自身合成肉碱需要消耗赖氨酸和蛋氨酸,添加外源性肉碱可以节约赖氨酸和蛋氨酸的消耗,从而增加了体内的氮储留,进一步使蛋白质沉积增加和肌肉增重^[18]。不同畜禽生长发育特性不同,不同肌肉部位生长发育所需的量可能亦不同,可能造成了上述试验结果部分差异。本研究结果表明,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱显著增加了生长育肥母猪背膘厚度。Ying 等^[19]在育肥猪饲料中添加 50 和 100 mg/kg L-肉碱的研究也表明,提高饲料 L-肉碱水平会增加育肥猪的背膘厚度,这与本研究肉碱对背膘厚度的影响作用一致。Heo 等^[20]研究表明,饲料添加 500 mg/kg L-肉碱显著降低了生长育肥猪的背膘厚度。本试验中 L-肉碱对育肥猪背膘厚度影响的与其他试验结果不尽相同,可能是由于本试验中饲料能量水平较高,同时本试验使用 3 点平均值取背膘厚度值,与其他试验有所不同;此外,L-肉碱的添加水平、添加阶段或者基础饲料组成的不同也是引起差异的可能原因。

3.3 L-肉碱对生长育肥母猪肉品质的影响

猪肉品质主要通过肉色、pH、滴水损失、剪切力和肌肉脂肪含量等指标评定。本研究结果表明,与对照组相比,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱可以显著降低生长育肥母猪背最长肌滴水损失和剪切力。滴水损失是衡量肌肉系水力的量化指标,系水力直接影响肉的颜色、风味、嫩度和营养价值,系水力较高,肉表现为鲜嫩和表面干爽,反之则肉表面水分渗出,营养成分丢失严重,肉品质下降^[21]。孟庆维等^[22]研究发现,饲料添加 50 mg/kg L-肉碱有降低二元杂生长公猪和母猪肌肉滴水损失的趋势;James^[23]同样研究发现,饲料添加 50 mg/kg L-肉碱有降低公猪肌肉滴水损失的趋势;杨彩梅^[24]研究发现,饲料同时添加 75 mg/kg

半胱胺和 100 mg/kg L-肉碱可显著减少猪肉的滴水损失。上述试验结果与本试验较为一致。肌肉系水力是影响肉嫩度的重要因素,嫩度是肉品质的重要的感官特征,是肌束的结构和生化特性的表现,特别是肌原纤维和中等细丝的结构和生化特性,以及肌间结缔组织^[25]。肌肉嫩度的评定通常采用肉的剪切力来表示。Ying 等^[26]研究表明,在添加干酒糟及其可溶物(DDGS)的饲料中补充 50 mg/kg L-肉碱可以显著降低生长育肥猪背最长肌的剪切力,与本试验结果较为一致。

肌纤维是组成肌肉的最主要重要部分,占肌肉总量的 75%~90%。根据 MyHC 的多态性将肌纤维类型分为 MyHC I、MyHC II a、MyHC II b 和 MyHC II x 4 种^[27]。其中,I 型纤维含有较多的脂肪和有氧代谢的酶系,II 型纤维含有较高的糖原,但有氧代谢酶的活性很低^[21,28]。本研究结果表明,与对照组相比,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱显著降低生长育肥母猪背最长肌 MyHC II b mRNA 相对表达量。有研究表明,肌肉中 MyHC II b 基因表达量与肌纤维直径呈显著正相关^[29]。本试验结果表明,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱可以显著降低肌纤维直径、肌纤维面积,显著提高肌纤维密度。肌纤维直径、肌纤维面积和肌纤维密度之间相互关联。本研究中肌纤维直径降低可能与 MyHC II b 基因表达量降低有关。其作用机制可能与陈代文等^[21]报道相似,有氧代谢型肌纤维(I 型纤维)含有更多的线粒体,肉碱转运脂肪酸进入线粒体进行 β -氧化,从而提高肌纤维密度。

肌肉脂肪是肌肉内仅次于肌肉组织的另一个重要组成部分,肌肉脂肪富含不饱和脂肪酸,极易被氧化,其氧化产物直接影响肉品挥发性风味成分^[30],虽然猪肉肌肉脂肪含量仅为 2%~4%^[31],但它对猪肉的嫩度以及肉品风味有重要的影响。有研究报道,猪肌肉肌纤维密度越大,肌肉脂肪含量越高,肉质越细嫩^[32-33]。本研究结果表明,饲料添加 100 mg/kg L-肉碱可以显著提高背最长肌肌肉脂肪含量。前人研究表明,生长育肥猪饲料单独添加 50 mg/kg L-肉碱或 4 g/kg 卵磷脂,肌肉脂肪含量分别为 2.22%、2.16%,同时添加两者,可以通过影响脂肪沉积来促进肌肉脂肪含量增加^[29]。脂肪的沉积是脂质合成与分解动态平衡的结果,L-肉碱有利于线粒体中乙酰辅酶 A 的转运,从而促进肌肉中脂肪酸和脂肪的合成^[34]。本研究结果

表明,饲粮添加 100 mg/kg *L*-肉碱可显著降低下颌脂肪指数。有研究报道,*L*-肉碱通过一种组织特异性机制影响脂质沉积,可能是由于脂肪分解与合成之间以及不同组织的脂肪之间的竞争而发生不同的脂肪代谢过程^[35]。尽管 *L*-肉碱可以促进脂肪酸氧化分解速率,但肌肉脂肪和下颌脂肪代谢情况可能不尽相同。本研究对背最长肌脂质代谢相关基因研究结果显示,*FAS* mRNA 相对表达量显著提高。*FAS* 是脂肪酸从头合成过程中最大合成速度的控制酶,催化丙二酰辅酶 A 合成棕榈酸^[36],由此说明饲粮添加 *L*-肉碱后肌肉中脂肪摄取和脂肪从头合成能力更强。Jense-Urstad 等^[37]研究也表明,*FAS* 对机体脂肪沉积尤其是肌肉脂肪沉积具有重要影响。本试验结果与前人结果不尽相同,可能是由于各试验中饲粮能量水平、原料结构存在不同,以及屠宰日龄、测定组织位置不同而引起的差异。本试验中 *L*-肉碱可能通过提高 *FAS* 基因表达量而提高了背最长肌肌肉脂肪的含量,但 *L*-肉碱提高 *FAS* 表达的相关机制尚不清楚,需要进一步研究。

敖秋枢^[38]研究表明,肌肉中 *MyHC II b* mRNA 相对表达量与肌肉脂肪含量呈显著负相关,本研究中,*L*-肉碱显著促进肌肉脂肪沉积可能与 *MyHC II b* 基因表达量降低有关。而 *MyHC I* mRNA 相对表达量差异不显著,可能是育肥猪 *MyHC II b* 型肌纤维比例高于 *MyHC I* 型肌纤维,*L*-肉碱对后者影响不明显。因此,*L*-肉碱有可能通过增强 *FAS* 表达来提高肌肉脂肪的含量,通过降低 *MyHC II b* 表达来提高肌纤维密度,从而影响肌肉组织的生物学特征,进而改善猪肉的嫩度和保水性,改善猪肉品质。

本试验进一步分析了背最长肌脂肪酸组成的差异,结果表明,饲粮添加 100 mg/kg *L*-肉碱可以显著降低亚油酸、花生酸和花生三烯酸含量。相关研究表明,肌肉脂肪酸含量增加,长链多不饱和脂肪酸花生三烯酸和花生四烯酸含量和比例均降低,而饱和脂肪酸与单不饱和脂肪酸含量与相对比例提高^[39]。本研究相关结果与上述研究结果不完全一致,尽管 *L*-肉碱可以显著提高肌肉脂肪酸含量,但单不饱和脂肪酸和多数饱和脂肪酸含量无显著变化。这与 Ying 等^[26]报道结果相似,在添加 DDGS 的饲粮中补充 *L*-肉碱,可以显著降低肌肉中亚油酸和花生酸的含量,但对其他单不饱和

脂肪酸和多数饱和脂肪酸含量无显著影响。Meng 等^[29]研究表明,*L*-肉碱对背最长肌中脂肪酸含量无显著影响,外源性 *L*-肉碱可能对育肥猪肌肉和脂肪组织中的脂肪酸组成的作用效果具有一定组织特异性,总体上,*L*-肉碱对改善脂肪酸组成有一定作用。

4 结论

本试验条件下,饲粮添加 100 mg/kg *L*-肉碱对生长育肥母猪的生长性能无显著影响,但可以影响背最长肌肌肉脂肪沉积和肌纤维性状,并改善胴体品质和肉品质。

参考文献:

- [1] LI Y H, LIU Y Y, LI F N, et al. Effects of dietary rami powder at various levels on carcass traits and meat quality in finishing pigs[J]. *Meat Science*, 2018, 143: 52-59.
- [2] JAYARAMAN B, LA K V, LA H, et al. Supplementation of guanidinoacetic acid to pig diets: effects on performance, carcass characteristics, and meat quality[J]. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(6): 2332-2341.
- [3] LIU Y Y, LI Y H, PENG Y L, et al. Dietary mulberry leaf powder affects growth performance, carcass traits and meat quality in finishing pigs[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2019, 103(6): 1934-1945.
- [4] OWEN K Q, WEEDEN T L, NELSEN J L, et al. The effect of *L*-carnitine additions on performance and carcass characteristics of growing-finishing swine[J]. *Swine Day*, 1993, 71(10): 117-121.
- [5] OWEN K Q, SMITH II J W, FRIESEN K G, et al. The effect of *L*-carnitine on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs[J]. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 1994(10): 161-164.
- [6] RINCKER M J, CARTER S D, REAL D E, et al. Effects of increasing dietary *L*-carnitine on growth performance of weanling pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2003, 81(9): 2259-2269.
- [7] OWEN K Q, NELSEN J L, GOODBAND R D, et al. Effect of *L*-carnitine and soybean oil on growth performance and body composition of early-weaned pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1996, 74(7): 1612-1619.
- [8] OWEN K Q, JI H, MAXWELL C V, et al. Dietary *L*-

- carnitine suppresses mitochondrial branched-chain keto acid dehydrogenase activity and enhances protein accretion and carcass characteristics of swine[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79(12): 3104-3112.
- [9] ZHANG L, YUE H Y, ZHANG H J, et al. Transport stress in broilers: I. Blood metabolism, glycolytic potential, and meat quality[J]. *Poultry Science*, 2009, 88(10): 2033-2041.
- [10] DUBOWITZ V, SEWRY C A, OLDFORS A. *Muscle biopsy: a practical approach*[M]. 5th ed. Netherlands: Elsevier, 2020.
- [11] MAO X B, GU C S, REN M, et al. *L*-isoleucine administration alleviates rotavirus infection and immune response in the weaned piglet model[J]. *Frontiers in Immunology*, 2018, 9: 1654.
- [12] ZENG X F, SUNKARA L T, JIANG W Y, et al. Induction of porcine host defense peptide gene expression by short-chain fatty acids and their analogs[J]. *PLoS One*, 2013, 8(8): e72922.
- [13] JAMES B W, TOKACH M D, GOODBAND R D, et al. Interactive effects of dietary ractopamine HCl and *L*-carnitine on finishing pigs: I. Growth performance[J]. *Journal of Animal Science*, 2013, 91(7): 3265-3271.
- [14] OWEN K Q, NELSSSEN J L, GOODBAND R D, et al. Effect of dietary *L*-carnitine on growth performance and body composition in nursery and growing-finishing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79(6): 1509-1515.
- [15] JAMES B W, TOKACH M D, GOODBAND R D, et al. Effects of dietary *L*-carnitine and ractopamine HCl on the metabolic response to handling in finishing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2013, 91(9): 4426-4439.
- [16] 王明鹏. 饲料中添加肉毒碱可节约蛋白质的探讨[J]. *中国饲料*, 1996(7): 21-23.
- WANG M P. Discussion on the saving of protein by adding carnitine to feed[J]. *China Feed*, 1996(7): 21-23. (in Chinese)
- [17] BONOMI A. The use of *DL*-carnitine in fattening pig feeding[J]. *Rivista di Suinicoltura*, 1995, 36(8): 49-55.
- [18] 王镜岩, 朱圣庚, 徐长法. *生物化学教程*[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 230-256.
- WANG J Y, ZHU S G, XU C F. *Biochemistry*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 230-256. (in Chinese)
- [19] YING W, DEROUCHÉY J M, TOKACH M D, et al. Effects of dietary *L*-carnitine and DDGS on growth, carcass characteristics, and loin and fat quality of growing-finishing pigs[C]//*Swine Day*. Manhattan: Kansas State University, 2011: 319-329.
- [20] HEO K, ODLE J, HAN I K, et al. Dietary *L*-carnitine improves nitrogen utilization in growing pigs fed low energy, fat-containing diets[J]. *The Journal of Nutrition*, 2000, 130(7): 1809-1814.
- [21] 陈代文, 张克英, 胡祖禹. 猪肉品质特征的形成原理[J]. *四川农业大学学报*, 2002, 20(1): 60-66.
- CHEN D W, ZHANG K Y, HU Z Y. The mechanism for developing pork quality traits[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2002, 20(1): 60-66. (in Chinese)
- [22] 孟庆维, 李嘉男, 吴迪, 等. 大豆磷脂和 *L*-肉碱对生长育肥猪生长性能、胴体品质、肉品质、脂肪酸组成及抗氧化能力的影响[C]//*中国畜牧兽医学动物营养学分会第十二次动物营养学术研讨会论文集*. 武汉: 中国农业大学出版社, 2016.
- MENG Q W, LI J N, WU D, et al. Effects of soybean lecithin and *L*-carnitine on growth performance, carcass quality, meat quality, fatty acid composition and antioxidant capacity of growing-finishing pigs[C]//*Proceedings of the 12th Symposium on Animal Nutrition, Animal Nutrition Branch, Chinese Association of Animal Science and Veterinary Medicine*. Wuhan: China Agricultural University Press, 2016. (in Chinese)
- [23] JAMES B W. Effect of dietary *L*-carnitine on finishing pig growth performance, meat quality, and stress parameters during handling[D]. Ph.D. Thesis. Manhattan: Kansas State University, 2009: 24-25.
- [24] 杨彩梅. 半胱胺、*L*-肉碱对肥育猪生长性能和胴体品质的影响[J]. *养猪*, 2005(4): 17-19.
- YANG C M. Effects of cysteamine and *L*-carnitine on growth performance and carcass quality of finishing pigs[J]. *Swine Production*, 2005(4): 17-19. (in Chinese)
- [25] 翟峰, 张勇. 钙蛋白酶抑制蛋白与肉嫩度相关性[J]. *中国饲料*, 2007(16): 11-12, 19.
- ZHAI F, ZHANG Y. Correlation between calpastatin and meat tenderness[J]. *China Feed*, 2007(16): 11-12, 19. (in Chinese)
- [26] YING W, TOKACH M D, DEROUCHÉY J M, et al. Effects of dietary *L*-carnitine and dried distillers grains with solubles on growth, carcass characteristics, and loin and fat quality of growing-finishing pigs[J]. *Jour-*

- nal of Animal Science, 2013, 91(7):3211-3219.
- [27] CHANG K C, FERNANDES K. Developmental expression and 5' end cDNA cloning of the porcine 2x and 2b myosin heavy chain genes[J]. DNA & Cell Biology, 1997, 16(12):1429-1437.
- [28] CHOE J H, CHOI Y M, LEE S H, et al. The relation between glycogen, lactate content and muscle fiber type composition, and their influence on postmortem glycolytic rate and pork quality[J]. Meat Science, 2008, 80(2):355-362.
- [29] MENG Q W, SUN S S, SUN Y C, et al. Effects of dietary lecithin and L-carnitine on fatty acid composition and lipid-metabolic genes expression in subcutaneous fat and *longissimus thoracis* of growing-finishing pigs[J]. Meat Science, 2017, 136:68-78.
- [30] 李凤娜, 王继成, 陈晓安. 猪肉品质及其影响因素的研究概况[J]. 肉类研究, 2006(7):9, 46-50.
LI F N, WANG J C, CHEN X A. General situation of pork quality and affecting factors[J]. Meat Research, 2006(7):9, 46-50. (in Chinese)
- [31] WOOD J D, RICHARDSON R I, NUTE G R, et al. Effects of fatty acids on meat quality: a review[J]. Meat Science, 2003, 66(1):21-32.
- [32] 沈元新, 徐继初. 金华猪及其杂种肌肉组织学特性与肉质的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1984, 10(3):265-272.
SHEN Y X, XU J C. The relationship between the muscle tissue characteristics of *Jinhua* swine and its hybrid and its meat quality[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1984, 10(3):265-272. (in Chinese)
- [33] 王亚鸣, 刘龙芳. 江西玉山猪肌肉组织学特征与肉质的关系[J]. 江西农业大学学报, 1994, 16(3):284-287.
WANG Y M, LIU L F. The relationship between muscular histological character and meat quality of *Yushan* swine in *Jiangxi* province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1994, 16(3):284-287. (in Chinese)
- [34] 高顺宾. 左旋肉碱对生长肥育猪生长性能、胴体组成和肉质的影响及其机理探讨[D]. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2001.
GAO S B. The effects of L-carnitine on growth performance, carcass characteristics and meat quality and approach to the mechanism of action in growing-finishing swine[D]. Master's Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [35] ZHENG J L, LUO Z, ZHUO M Q, et al. Dietary L-carnitine supplementation increases lipid deposition in the liver and muscle of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) through changes in lipid metabolism[J]. British Journal of Nutrition, 2014, 112(5):698-708.
- [36] SMITH S, WITKOWSKI A, JOSHI A K. Structural and functional organization of the animal fatty acid synthase[J]. Progress in Lipid Research, 2003, 42(4):289-317.
- [37] JENSEN-URSTAD A P L, SEMENKOVICH C F. Fatty acid synthase and liver triglyceride metabolism: housekeeper or messenger[J]. Biochimica et Biophysica Acta: Molecular and Cell Biology of Lipids, 2012, 1821(5):747-753.
- [38] 敖秋桅. 骨骼肌肌纤维类型与巴马香猪肉质性状的相关性研究[D]. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学, 2014.
AO Q W. Study on the relationship between the muscle fiber types with meat quality traits of *Bama Xiang* pig[D]. Master's Thesis. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)
- [39] 冯岗, 孙宝忠, 卢凌, 等. 肌内脂肪与背最长肌肉质、脂肪酸组成的关系[J]. 食品工业科技, 2013, 34(10):129-132.
FENG G, SUN B Z, LU L, et al. Relationships between intramuscular fat and pork quality, fatty acid composition of pig *longissimus* muscle[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(10):129-132. (in Chinese)

Effects of Dietary L-Carnitine on Growth Performance, Carcass Quality and Meat Quality of Growing-Finishing Female Pigs

GU Changsong^{1,2} LI Bin^{1,2} HU Shengdi³ HUANG Lirong^{1,2} ZENG Ziyou^{1,2} ZHU Zhengpeng^{1,2*}

(1. Sichuan TEK-MAX Biotechnology Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 2. Sichuan Tequ Agriculture and Animal Husbandry Technology Group Co., Ltd., Chengdu 610207, China; 3. New Hope Liuhe Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of dietary L-carnitine on growth performance, carcass quality and meat quality of growing-finishing female pigs. A total of 420 female PIC pigs with similar body weight of (30.42±3.24) kg were randomly divided into 2 groups with 7 replicates in each group and 30 pigs in each replicate. Pigs in the control group were fed a basal diet, and those in the experimental group were fed the basal diet supplemented with 100 mg/kg L-carnitine. The experiment lasted for 105 days. The results showed as follows: 1) compared with the control group, the average daily gain, the average daily feed intake, the feed to gain ratio and the livability of growing-finishing female pigs in the experimental group were not significantly different in different growing stages ($P>0.05$). 2) Compared with the control group, dietary L-carnitine significantly increased the backfat thickness and the length and weight of *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs ($P<0.05$), significantly reduced the mandibular fat index ($P<0.05$), significantly decreased the shear force, the drip loss, the myofiber diameter and the myofiber area in *longissimus dorsi* ($P<0.05$), and significantly increased the myofiber density in *longissimus dorsi* ($P<0.05$). 3) Compared with the control group, dietary L-carnitine significantly increased the intramuscular fat content in *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs ($P<0.05$), but significantly decreased the contents of C18:2n6c, C20:0 and C20:3n6 in *longissimus dorsi* ($P<0.05$). 4) Compared with the control group, dietary L-carnitine significantly increased the fatty acid synthase (FAS) mRNA relative expression level in *longissimus dorsi* of growing-finishing female pigs ($P<0.05$), and significantly decreased the myosin heavy chain II b (MyHC II b) mRNA relative expression level in *longissimus dorsi* ($P<0.05$). In conclusion, dietary 100 mg/kg L-carnitine does not affect growth performance of growing-finishing female pigs, but it can improve the carcass quality and meat quality by affecting the intramuscular fat deposition and myofiber traits in *longissimus dorsi*. [Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(4):1964-1975]

Key words: L-carnitine; growing-finishing female pigs; carcass quality; myofiber; meat quality