

陈宇煌, GYAWALI I, 罗培, 等. 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡屠宰性能和肉品质的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (8): 13-21.

CHEN Y H, GYAWALI I, LUO P, et al. Effects of dietary succinic acid on carcass performance and meat quality of Qingyuan partridge chicken [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (8): 13-21.

日粮添加琥珀酸对清远麻鸡屠宰性能和肉品质的影响

陈宇煌^{1,2#}, Ishwari GYAWALI^{1#}, 罗培¹, 潘木水³, 朱晓彤¹, 卢逸华¹,
顾婕¹, 王丽娜¹, 王松波¹, 高萍¹, 江青艳¹

(1. 华南农业大学动物科学学院, 广东 广州 510640;

2. 潮州市农业科学技术研究中心, 广东 潮州 515633;

3. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 旨在研究日粮中添加琥珀酸对清远麻鸡屠宰性能和肉品质的影响。选取 75 日龄雌性清远麻鸡 210 只, 随机分为 3 组, 每组 5 个重复, 每个重复 14 只鸡, 其中对照组饲喂基础饲粮, 2 个处理组分别饲喂含 0.1% 和 0.2% 琥珀酸的饲粮, 试验开始前预饲 3 d, 正式试验期 40 d; 试验结束时, 测定屠宰性能, 采集血清检测生化指标, 采集腿肌、胸肌检测肌肉品质和营养成分, 实时荧光定量 PCR 检测腿肌、胸肌、腹部脂肪、肝脏的蛋白代谢和脂质代谢相关基因的表达水平。结果: 与对照组相比, 日粮添加 0.2% 琥珀酸组的胸肌率显著提高 ($P < 0.05$), 胸肌粗脂肪含量显著提升 ($P < 0.05$); 日粮添加 0.1% 琥珀酸组胸肌剪切力显著降低 ($P < 0.05$), 胸肌嫩度明显提高; 日粮添加 0.2% 琥珀酸组的腹部脂肪中脂肪酸结合蛋白 (*A-FABP*) 的 mRNA 表达量显著降低 ($P < 0.05$); 日粮添加 0.1% 琥珀酸组的肝脏中固醇调节元件结合蛋白 1c (*SREBP-1c*) 的 mRNA 表达量显著降低 ($P < 0.05$), 但对腹脂率无显著影响。结果表明, 饲粮中添加琥珀酸可以提升清远麻鸡的屠宰性能和肉品质, 且对清远麻鸡生长性能无负面影响。

关键词: 琥珀酸; 清远麻鸡; 屠宰性能; 肉品质

中图分类号: S831 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-5130(2025)08-0013-09

Effects of dietary succinic acid on carcass performance and meat quality of Qingyuan partridge chicken

CHEN Yuhuang^{1,2#}, Ishwari GYAWALI^{1#}, LUO Pei¹, PAN Mushui³, ZHU Xiaotong¹, LU Yihua¹,
GU Jie¹, WANG Lina¹, WANG Songbo¹, GAO Ping¹, JIANG Qingyan¹

(1. College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China;

2. Chaozhou Agricultural Science and Technology Research Center, Chaozhou 515633, China;

3. Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences,

Guangzhou 510640, China)

Abstract: In this study, we investigated the effects of dietary succinic acid on the carcass traits and meat quality of Qingyuan partridge chickens. A total of 210 75-day-old female Qingyuan partridge chickens were selected and randomly divided into 3 groups, with 5 replicates in each group and 14 chickens per replicate. The control group was fed with basal diet, while the other two groups were fed with diets containing 0.1% and 0.2% succinic acid, respectively, for 40 days after 3 days' pre-feeding. At the end of the experiment, two chickens were euthanized from each replicate and tissue samples for carcass performance determination were collected according to agricultural industry standards. Then, serum samples were collected for determination of serum biochemical indexes. Next, thigh and breast muscle samples were collected for determination of meat quality and nutritional component by reagent kits and related instruments. Finally, the expression of genes related to protein metabolism and lipid metabolism in the thigh muscle, breast muscle, abdominal fat, and liver were tested by real-time fluorescence quantitative PCR. The results showed that the chickens fed with 0.2% succinic acid improved their breast muscle yield ($P < 0.05$) and crude fat ($P < 0.05$), compared with the control group. The chickens fed with 0.1% succinic acid had reduced the shear force in them

收稿日期: 2024-08-21; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 广东省岭南现代农业重点实验室项目 (国家基金委, NZ2021028); 广东省重点研发计划项目 (国家基金委, 2019B020218001)

第一作者: 陈宇煌, 男, 硕士, 助理畜牧师; Ishwari GYAWALI, 男, 尼泊尔人, 博士研究生。[#]共同第一作者

* 通信作者: 江青艳, 教授, 主要从事动物营养代谢转化机制及其调控等工作, E-mail: qyjiang@scau.edu.cn。

($P < 0.05$), compared with the control group, and the tenderness of their breast muscle was increased. The chickens fed with 0.2% succinic acid had reduced the mRNA expression of *A-FABP* in their abdominal fat ($P < 0.05$), and the chickens fed with 0.1% succinic acid had reduced the mRNA expression of *SREBP-1c* in their liver ($P < 0.05$), but had no significant effect on their abdominal fat rate. These findings indicated that a diet supplemented with succinic acid could increase their carcass performance and meat quality with no negative effects on their growth performance.

Keywords: succinic acid; Qingyuan partridge chicken; carcass performance; meat quality

中国黄羽肉鸡因其独特的风味受到当地消费者的高度认可^[1-2]。清远麻鸡作为最重要的地方品种之一, 皮质金黄, 肉质风味独特, 肉用品质优良^[3]。随着人们生活水平的提高, 消费者对鸡肉的追求不再局限于肉的产量, 而是开始对肉品的口感和风味提出了更高的要求^[4]。如何在不影响肉鸡生长性能的前提下, 寻找安全可靠的饲料添加剂, 提高并改善屠宰性能、肉品质, 已成为养殖户和消费者备受关注的重点问题^[5]。

琥珀酸是连接三羧酸循环和线粒体呼吸链的重要中间产物。研究发现, 琥珀酸能够通过细胞外信号调节激酶 (Erk) / 蛋白激酶 (Akt) 通路, 调节骨骼肌蛋白代谢^[6], 还可诱导骨骼肌纤维从快纤维类型向慢纤维类型转变^[7]。目前, 关于琥珀酸能改善清远麻鸡肉品质等方面的应用研究较少。梁冰清^[8]在琥珀酸对肌肉生长和猪肉品质的影响研究中发现, 对三元杂交育肥猪饲喂含 1% 琥珀酸的饲料可促进骨骼肌蛋白质的合成和肌肉生长, 在一定程度上改善猪肉品质; 刘佳鑫等^[9]在日粮中添加琥珀酸对 AA 肉鸡生产性能和肠道健康的影响研究中发现, 对 AA 肉鸡饲喂含高剂量 (2 g/kg) 琥珀酸的饲料能够促进其生长发育。因此, 本试验旨在研究日粮中添加不同浓度琥珀酸对清远麻鸡生长性能、屠宰性能、代谢和肉品质的影响, 以期在清远麻鸡生产中的推广应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验在广州花都宝桑园养殖场进行。从清远市凤翔麻鸡发展有限公司获得 75 日龄清远麻鸡 210 只。试验日粮由广东华红饲料科技有限公司配制。饲料组成及营养水平见表 1。试验所用的琥珀酸 (纯度 $\geq 99.0\%$) 由生工生物工程 (上海) 股份有限公司提供。所有清远麻鸡均按照中华人民共和国科技部《实验动物饲养指引》进行饲养, 并经华南农业大学动物实验委员会 (中国广州, 项目编号 SYXK 20220136) 批准。

1.2 试验设计

在半开放式地面厚垫料上进行平养试验, 定期清洁鸡舍, 更换垫料并保证试验期间垫料干燥, 每天 8:00、17:00 进行饲喂。试验开始前饲喂基础日粮 3 d, 空腹 12 h 后称重。随机分为 3 组, 每组 5 个重复, 每个重复 14 只鸡, 每个重复为 1 个饲养单元, 其中对照组给予基础日粮, 2 个试验组分别饲喂含有 0.1% 和 0.2% 琥珀酸的日粮。正式试验期 40 d。自由采食和饮水。每天观察各组肉鸡的日采食量和健康状况。

表 1 基础日粮组成及营养水平

项目	对照组	0.1% 琥珀酸组	0.2% 琥珀酸组
玉米	61.4	61.3	61.2
豆粕	20	20	20
麦麸	5	5	5
小麦次粉	4	4	4
原料/%	豆油	5	5
	鸡血球蛋白粉	0.5	0.5
	丙酸宝 (防腐剂)	0.1	0.1
	预混料 ¹⁾	4	4
	琥珀酸	0	0.1
代谢能/(MJ·kg ⁻¹)	3 100	3 100	3 100
粗蛋白 (CP) /%	16	16	16
粗纤维/%	2.4	2.4	2.4
粗脂肪 (CF) /%	7.8	7.8	7.8
钙/%	0.75	0.75	0.75
营养成分	磷/%	0.55	0.55
	赖氨酸/%	0.87	0.87
	蛋氨酸/%	0.33	0.33
	蛋胱氨酸/%	0.59	0.59
	苏氨酸/%	0.61	0.61
	色氨酸/%	0.52	0.52

注: ¹⁾ 预混料为每千克饲料提供: VA 10 800 IU, VD₃ 3 000 IU, VE 30 IU, VK₃ 6 mg, VB₁₃ mg, VB₂ 9 mg, VB₆ 6 mg, VB₁₂ 0.03 mg, 烟酰胺 60 mg, 泛酸 18 mg, 生物素 0.18 mg, 铁 119 mg, 碘 1.17 mg, 硒 0.26 mg, 铜 15 mg, 锰 152 mg, 锌 100 mg。

1.3 生长性能测定

在试验开始前1 d测定各组的初始体重。每天记录肉鸡的健康状况。饲喂40 d后,禁食12 h,进行称重。以体重、平均日增重、平均日采食量和料重比评价生长性能。

1.4 屠宰步骤及样品收集

试验结束禁食12 h后,每个重复取体重相近的2只鸡称重,采用颈静脉采血法,每只采血约10 mL,分离血清,测定血清生化指标。在放血和拔毛后,记录剩余重量,分别对全净膛、腿肌、胸肌、腹部脂肪和肝脏进行称重。采集右侧去皮胸肌和腿肌样本进行肉质分析。从相同的位置采集部分腿肌、胸肌、腹部脂肪和肝脏,并立即冷冻在液氮中以作进一步分析。

1.5 屠宰性能测定

参照农业行业标准 NY/T 823—2004《肉鸡生产性能术语与统计》,测定屠体重、全净膛重、全净膛率、屠宰率、胸肌率、腿肌率、肝脏指数和腹脂率。所有比率均以占屠体重的百分比表示,而屠宰率则以活体重的百分比表示。

1.6 肉品质测定

分析右侧胸肌和腿肌样品的pH值、肉色、蒸煮损失、滴漏损失和剪切力。

pH值:采用Testo 205便携式pH计(德图仪表有限公司,深圳)分别测定屠宰后45 min和24 h胸肌和大腿肌的pH值。探针从3个侧面插入每个样品,得到3个值,取平均值。在测试之前,使用pH值为4.01、7.00和10.01的标准缓冲溶液对pH计进行校准。

肉色:使用NR10QC肉色仪(广东三恩时科技有限公司)在胸肌和腿肌样品表面的不同位置进行3次肉色测量。样品用纸巾擦干,肉色仪垂直放置于样品上。在初始位置测量后,将样品旋转120° 2次以获得后续测量。屠宰后45 min记录亮度(L^*)、红度(a^*)和黄度(b^*)值。

滴水损失:将样品切成规则条状,初始称重。然后用金属丝将它们悬浮在一个空纸杯上,在4℃下放置24 h,随后重新称重以测量滴水损失。

滴水损失% = (初始重 - 滴水后重量) / 初始重 × 100。

蒸煮损失:计算滴水损失后,样品在4℃下保存48 h,取出,用纸巾擦干表面水分,重新称重。随后,将每个样品放入有拉链密封的聚乙烯袋中,在85℃水浴中加热20 min,取出,在自来水下冷却至

室温,并重新称重。

蒸煮损失% = (初始重 - 煮后肉重) / 初始重 × 100。

剪切力:在测定蒸煮损失后,将样品在4℃下保存24 h,之后使用RH-N50肉品嫩度测定仪(广州润湖仪器有限公司)测定剪切力。将每个样品修剪成3个条状2 cm × 1 cm × 1 cm。随后,每块肉在不同位置垂直于肌纤维切割3次,平均9次被记录为最终结果。

1.7 肌肉营养成分测定

水分:按照国家标准 GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》,将样品在101~105℃下直接干燥,测定水分百分比。

粗蛋白(CP):CP含量分析采用FOSS 2300全自动氮分析仪,方法参照 GB 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定》。

粗脂肪(CF):CF含量采用FOSS Soxtec系统脂肪分析仪,按照 GB/T 14772—2008《食品中粗脂肪的测定》进行测定。

新鲜肌肉中的总蛋白(TP)和甘油三酯(TG):TP和TG含量采用南京建成生物工程研究所的试剂盒,按照试剂盒的说明进行测定。

1.8 血清生化指标测定

血清样品解冻后,使用南京建成生物工程研究所的商品化试剂盒测定血清白蛋白(ALB)、血清尿素氮(BUN)、胰岛素样生长因子1(IGF-1)、TG和游离脂肪酸(NEFA)含量。所有测定和计算过程严格按照试剂盒说明书进行。

1.9 总RNA提取和实时荧光定量PCR(RT-qPCR)

使用HiPure Total RNA Mini kit试剂盒从胸肌、腹脂和肝脏的分子样品中提取总RNA。随后,使用反转录试剂盒对RNA进行逆转录,该试剂盒包括gDNA去除剂以防止基因组DNA污染。采用2×Color SYBR Green qPCR Master Mix (ROX2 plus)进行RT-qPCR,β-actin作为内参。使用的引物详见表2,使用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 法进行相对定量分析。

1.10 数据统计与分析

数据分析均采用SPSS 8.0统计软件进行单因素方差分析及LSD法检测, $P < 0.05$ 表示具有统计学差异。所有图表均采用GraphPad Prism 8.0.1制作。数值以“平均数±标准误”表示。

表 2 目的基因 PCR 引物

基因名称	序列号	正向引物 (5'→3')	反向引物 (5'→3')
4E-BP1	XM_424384.6	GGGCGGAACCAGGATTATTTATG	CGGAAGCTCAGAAGGTGGTG
β -actin	NM_205518.1	TTACTCGCCTCTGTGAAGGC	TCCTAGACTGTGGGGACTG
MuRF1	XM_015297755.2	GACCGCATCCAGACCATCAT	GCGCTGAGAACGCATCAA
MAFbx	NM_001030956.1	GACCGCTTTCTCGATGAG	CCTTGTATTTCAGTAGTCTTTTTTCT
ACC	XM_015295697.2	GCTGGGTTGAGCGACTAATGA	GAAACTGGCAAAGGACTGACG
SREBP-1c	XM_015294109.2	TACCGCTCATCCATCAACGAC	TTCTCAGGATCGCCGACTT
FAS	NM_205155.3	TGCTATGCTTGCCAACAGGA	ACTGTCCGTGACGAATTGCT
LPL	XM_015280414.2	TTTGAGTATGCTGATGCCCTAT	CAACAGGCTTCTGAATCCCAAT
CPT-1	XM_015286798.2	GGAGAACCCAAGTAAAAGTAATGAA	GAAACGACATAAAGGCAGAACAGA
ATGL	NM_001113291.1	CCTTTGACTCCGCTTGAA	GGACCCAGGAACCTCTTTTCG
MTP	NM_001109784.2	GTCTGAAGGACATGCCTGC	CCAGCAAAGGAGTCCAGGTT
apoB	NM_001044633.1	GCCGTTTGACTGGGAGTACA	TCTTCCCATTTCCTGGTGCC
FAT/CD36	XM_025147449.1	CTGGAAAGTTACTGCGATT	GCGAGAACTGTGAAACGATA
A-FABP	NM_204290.1	GCCTGACAAAATGTGCGACC	TTCTGTGTAGCAAACCCAC
IGF-1	NM_001004384.2	GCTTTTGTGATTTCTTGAAGGTGAA	CATACCCTGTAGGCTTACTGAAGTA
IGF-1R	NM_205032.1	AGAAGCCGTTGTGCGAGAA	GCACTCAGGATGGCAACACTC
Myostatin	NM_001001461.1	GGTATCTGGCAGAGTATGTATGTGAA	CAAAATCTCTGCGGGACCGT

注：4E-BP1，真核翻译起始因子4E结合蛋白1； β -actin， β -肌动蛋白；MuRF1，肌肉环指；MAFbx，肌肉萎缩F；ACC，乙酰CoA羧化酶；SREBP-1c，固醇调节元件结合蛋白1c；FAS，脂肪合成酶；LPL，脂蛋白脂肪酶；CPT-1，肉碱棕榈酰基转移酶1；ATGL，脂肪甘油三酯脂肪酶；MTP，微粒体甘油三酸酯转移蛋白；apoB，载脂蛋白B；FAT/CD36，脂肪酸转位酶；A-FABP，脂肪酸结合蛋白；IGF-1，胰岛素样生长因子1；IGF-1R，胰岛素样生长因子1受体；Myostatin，肌肉生长抑制素。

2 结果与分析

2.1 生长性能

由表3可见，各组的平均日增重、平均日采食量和饲料转化率均无显著差异。

2.2 屠宰性能

由表4可知，与对照组相比，日粮添加0.1%和0.2%琥珀酸对清远麻鸡活体重、屠体重、全净膛重、屠宰率、全净膛率以及腿肌率、肝脏指数和腹脂率无显著影响，而日粮添加0.2%琥珀酸显著提高了胸肌率 ($P < 0.05$)。

表 3 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡生长性能的影响 (n=5)

指标	对照组	0.1%琥珀酸组	0.2%琥珀酸组
初重/g	629.09±34.93	629.00±34.77	629.12±34.90
末重/g	1285.23±55.69	1279.37±49.96	1278.45±48.47
平均日增重/g	16.41±0.55	16.26±0.40	16.23±0.51
平均日采食量/g	74.08±3.08	73.72±2.90	72.08±2.56
饲料转化率	4.51±0.05	4.53±0.08	4.44±0.10

表 4 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡屠宰性能的影响 (n=10)

指标	对照组	0.1%琥珀酸组	0.2%琥珀酸组
活体重/g	1226.40±44.51	1282.96±31.91	1278.72±36.08
屠体重/g	1062.74±46.31	1120.67±26.51	1115.56±33.30
全净膛重/g	768.41±34.72	809.22±22.38	810.48±22.57
屠宰率/%	86.54±1.10	87.38±0.42	87.21±0.28
全净膛率/%	62.55±0.76	63.05±0.38	63.41±0.57
胸肌率/%	17.69±0.53 ^b	18.25±0.42 ^{ab}	19.15±0.51 ^a
腿肌率/%	21.70±0.33	20.84±0.39	21.23±0.41
肝脏指数/%	2.10±0.08	1.90±0.08	1.97±0.07
腹脂率/%	4.10±0.55	5.07±0.36	4.68±0.56

注：同行数据肩标不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.3 肉品质和营养成分

在胸肌中 (表5), 与对照组相比, 0.1%琥珀酸组剪切力显著降低 ($P<0.01$), 而0.2%琥珀酸组无显著差异。各组屠宰后45 min和24 h的pH值、肉色参数 (45 min的 L^* 、 a^* 、 b^*)、24 h后的滴水损失和蒸煮损失均无显著差异。0.2%琥珀酸组的水

分含量显著低于对照组 ($P<0.95$)。0.1%和0.2%琥珀酸组的CF含量均显著高于对照组 ($P<0.05$)。在腿肌中 (表6), 对照组、0.1%琥珀酸组和0.2%琥珀酸组在屠宰后45 min和24 h的pH值、肉色参数、24 h后滴漏损失、蒸煮损失、剪切力、水分含量、蛋白质组成或甘油三酯含量等方面均没有显著差异。

表5 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡胸肌肉品质和营养成分的影响 ($n=10$)

指标	对照组	0.1%琥珀酸组	0.2%琥珀酸组
pH _{45 min} 值	6.26±0.14	6.25±0.10	6.13±0.08
pH _{24 h} 值	5.73±0.34	5.78±0.34	5.76±0.23
L^* 值	45.78±0.99	45.54±1.01	45.20±0.96
a^* 值	7.93±0.51	7.54±0.39	8.02±0.71
b^* 值	7.08±0.49	7.45±0.56	8.28±0.86
滴水损失/%	1.46±0.035	1.62±0.15	1.75±0.19
蒸煮损失/%	27.64±2.02	26.76±1.47	29.26±1.06
剪切力/N	36.98±3.95 ^a	24.71±3.73 ^b	32.01±3.97 ^{ab}
水分/%	72.89±0.23 ^a	72.47±0.27 ^{ab}	72.17±0.18 ^b
CP (干物质) /%	24.82±0.27	24.23±0.77	25.07±0.32
CF (干物质) /%	0.28±0.06 ^b	0.70±0.11 ^a	0.69±0.11 ^a
TP (鲜样) / (mg·g ⁻¹)	123.40±3.09	126.21±4.37	132.87±3.73
甘油三酯 (鲜样) / (×10 ⁻³ mmol·g ⁻¹)	4.42±1.9	4.80±0.83	4.91±0.81

表6 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡腿肌肉品质和营养成分的影响 ($n=10$)

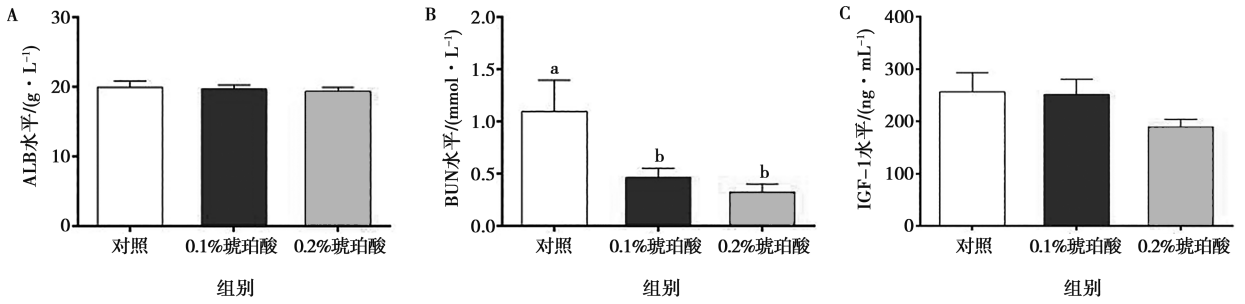
指标	对照组	0.1%琥珀酸组	0.2%琥珀酸组
pH _{45 min} 值	6.46±0.05	6.45±0.05	6.39±0.03
pH _{24 h} 值	6.17±0.05	6.20±0.05	6.33±0.05
L^* 值	50.36±0.184	51.69±1.41	49.97±2.44
a^* 值	17.73±1.10	18.10±0.70	17.82±0.85
b^* 值	9.50±0.59	9.19±0.44	9.38±0.47
滴水损失/%	1.93±0.14	1.93±0.27	1.73±0.20
蒸煮损失/%	29.44±1.69	30.31±0.97	28.36±1.27
剪切力/N	26.38±2.61	27.91±3.57	23.88±2.28
水分/%	73.06±0.47	73.01±0.25	73.25±0.23
CP (干物质) /%	21.94±1.74	22.03±0.90	21.99±2.01
CF (干物质) /%	2.84±0.42	2.35±0.15	2.35±0.21
TP (鲜样) / (mg·g ⁻¹)	39.64±4.23	39.69±3.24	39.79±3.78
甘油三酯 (鲜样) / (×10 ⁻³ mmol·g ⁻¹)	1.53±1.08	2.62±1.23	1.77±0.90

2.4 蛋白质代谢

2.4.1 日粮添加琥珀酸对血清蛋白质代谢的影响

由图1可知, 日粮添加琥珀酸没有改变清远麻鸡

ALB和IGF-1水平, 但均显著降低了BUN含量 ($P<0.05$)。



不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图1 日粮添加琥珀酸对血清蛋白质代谢的影响 ($n = 10$)

2.4.2 日粮添加琥珀酸对胸肌蛋白质代谢相关基因的影响

由图2可见,与对照组相比,0.1%和0.2%琥珀酸组的胸肌中IGF-1和IGF-1R mRNA表达量均无显著差异;然而,与0.1%琥珀酸组相比,0.2%琥珀酸组IGF-1R mRNA表达量显著降低 ($P < 0.05$)。4E-BP1、MAFbx和Myostatin的mRNA表达量在所有

组中没有差异。与0.1%琥珀酸组相比,0.2%琥珀酸组MuRF1的mRNA表达量显著降低 ($P < 0.05$)。

2.5 脂质代谢

2.5.1 日粮添加琥珀酸对血清脂质代谢的影响

由图3可见,与对照组相比,添加0.2%琥珀酸显著降低了血清TG水平 ($P < 0.05$),而NEFA水平组间无显著差异。

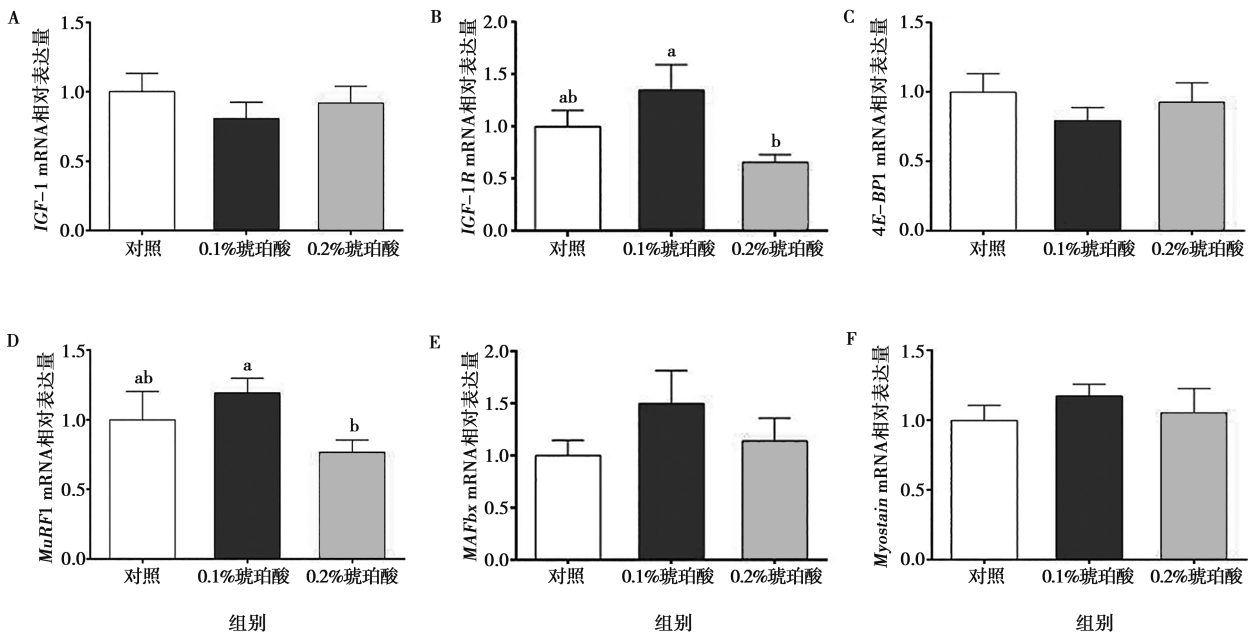


图2 日粮添加琥珀酸对胸肌蛋白质代谢相关基因的影响 ($n = 10$)

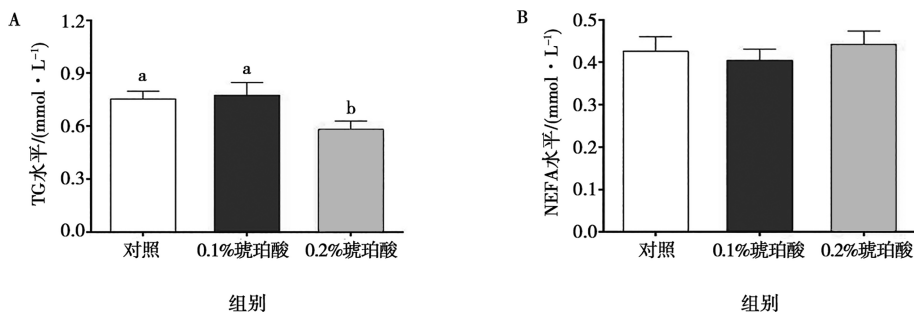


图3 日粮添加琥珀酸对血清脂质代谢的影响 ($n = 10$)

2.5.2 日粮添加琥珀酸对肝脏脂质代谢相关基因的影响

由图4可知,在肝脏中,与对照组相比,0.1%琥珀酸组 *SREBP-1c* mRNA 表达量显著降低 ($P < 0.05$),对脂肪合成相关基因 (*FAS*、*ACC*、*apoB*) 未见影响。此外,日粮添加琥珀酸导致肝脏中 *MTP* mRNA 表达量降低,但无显著差异。肝脏中脂质分解

相关基因 (*LPL*、*CPT-1* 和 *ATGL*) mRNA 表达量无显著差异。

2.5.3 日粮添加琥珀酸对腹部脂肪组织脂质代谢相关基因的影响

由图5可知,在腹部脂肪组织中,与对照组相比,日粮添加0.2%琥珀酸显著降低了脂肪转运标志物 *A-FABP* 的 mRNA 表达量 ($P < 0.05$)。

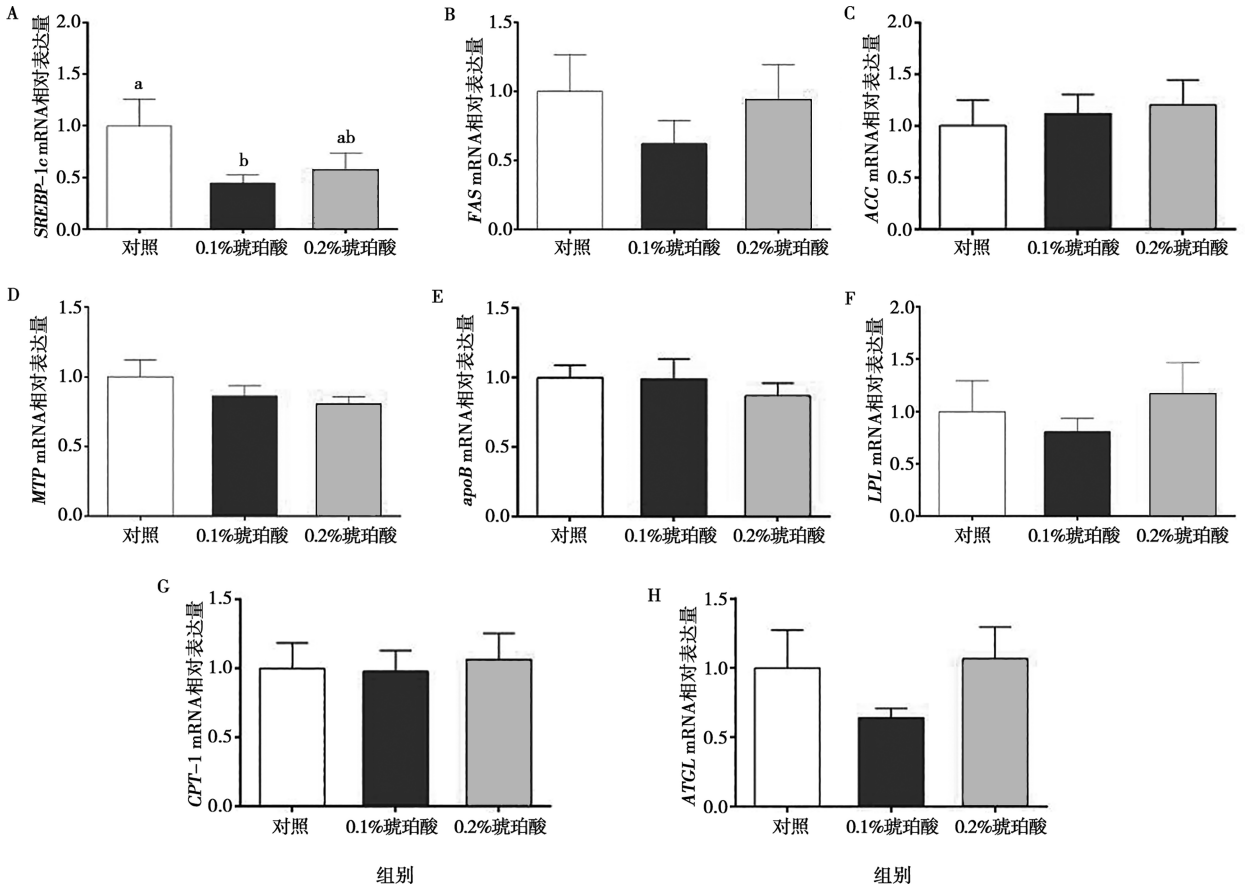


图4 日粮添加琥珀酸对肝脏脂质代谢相关基因的影响 ($n = 10$)

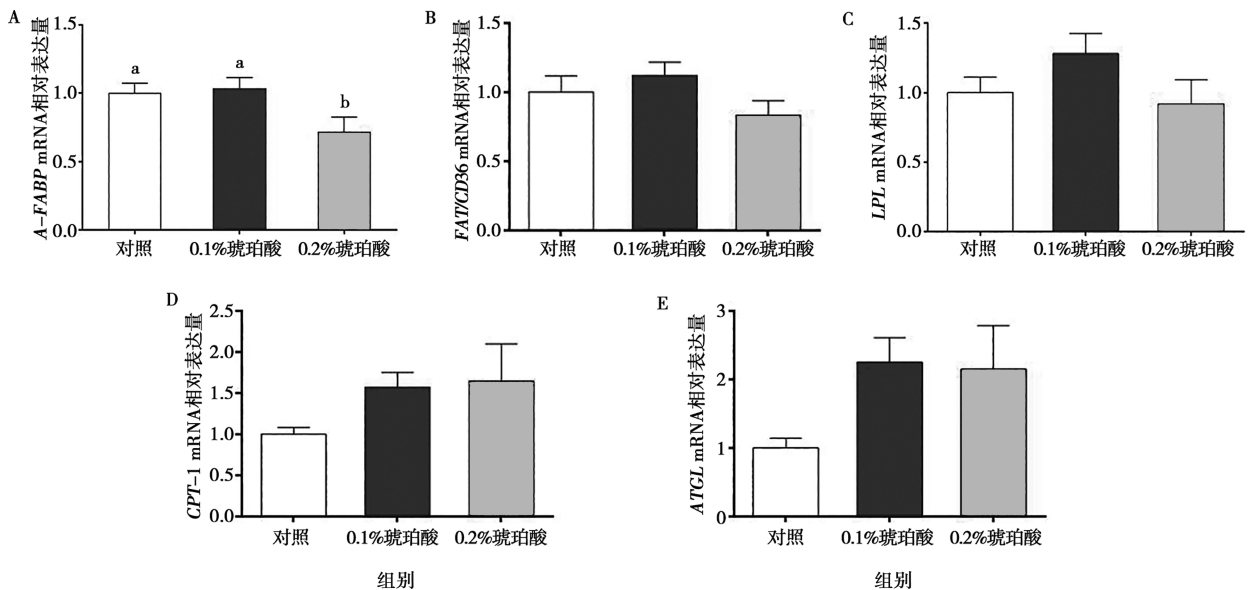


图5 日粮添加琥珀酸对腹部脂肪脂质代谢相关基因的影响 ($n = 10$)

3 讨论

3.1 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡生长和屠宰性能的影响

生长性能是衡量畜禽生产效益的重要指标^[10]。先前的研究发现日粮添加琥珀酸能促进 AA 肉鸡生长发育^[9]。本试验结果显示,在日粮中添加琥珀酸对清远麻鸡的生长性能无明显促进作用,这可能与试验动物的品种,日龄等因素有关。

屠宰性能不仅能反映畜禽的产肉能力,也是衡量其经济效益的重要指标^[11]。胸肌是胴体的重要组成部分,对肉鸡生产的经济效益具有重要影响^[12]。本试验结果显示,在日粮中添加 0.2% 琥珀酸可以显著提高胸肌率,且对生长性能无负面影响,因而在日粮中添加琥珀酸能改善清远麻鸡的屠宰性能。

3.2 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡肉品质和营养成分的影响

肉质的好坏取决于肉色、嫩度和营养成分等因素^[13]。前人的研究表明,肌内脂肪可以增强嫩度和风味^[14-15],减少肌肉中的水分含量^[16]。本试验结果显示,日粮添加琥珀酸使胸肌中 CF 的含量显著增加,同时,添加 0.1% 琥珀酸还降低了胸肌剪切力,添加 0.2% 琥珀酸降低了胸肌中的水分含量。因此,日粮添加琥珀酸能够增加清远麻鸡胸肌嫩度并减少水分,从而改善清远麻鸡肉品质。

3.3 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡蛋白质代谢的影响

ALB 和 BUN 作为蛋白质代谢中的重要指标,能反映机体的蛋白质代谢情况^[10]。本研究发现,日粮添加琥珀酸的处理组 BUN 水平整体下降,但未影响 ALB 水平,推测琥珀酸可能参与促进蛋白质沉积。然而,试验发现胸肌 TP 和 CP 未有显著性差异,且不影响蛋白质代谢相关基因的表达。Wang 等^[7]研究发现,琥珀酸能够通过琥珀酸受体 1 (SUNCR1) 及其下游的钙/活化 T 细胞核因子 (NFAT) 信号通路诱导小鼠腓肠肌肌纤维从 II 型向 I 型转变。以上结果表明,在饲料中添加琥珀酸可能诱导清远麻鸡胸肌中 II 型纤维向 I 型纤维的转变,而不影响胸肌蛋白质沉积。

3.4 日粮添加琥珀酸对清远麻鸡脂质代谢的影响

禽类的肝脏是脂质合成和分解代谢的主要部位^[17]。SREBP-1c 是这一过程中的关键调节因子,可调节脂肪酸和 TG 合成相关酶的表达和激活来控制脂质合成^[18-19]。本研究发现,饲料添加琥珀酸后,降低了清远麻鸡肝脏中 SREBP-1c mRNA 的表达,引起其肝脏脂质合成降低,而胸肌中 CF 含量显著升高。李良华^[20]研究表明,随着肌纤维面积增大,肌

内脂肪含量有降低的趋势。这提示,胸肌 CF 含量增加可能与肝脏脂肪合成无关,而可能是琥珀酸诱导清远麻鸡胸肌中 II 型纤维向 I 型纤维的转变,使得胸肌中脂肪含量增加。由于受到条件限制,本研究未能对胸肌的肌纤维类型组成及代谢相关指标进行测定。

禽类腹部脂肪组织的主要功能是储存和代谢,通过储存和消耗能量,进而维持机体的产热和代谢稳态。A-FABP 蛋白是脂肪细胞脂肪酸结合蛋白,A-FABP 蛋白在脂肪酸转运和脂质代谢中起着至关重要的作用^[21-22]。Shi^[23]等报道了 A-FABP 基因的高表达与鸡腹部脂肪组织减少相关。本试验中发现,饲料添加 0.2% 琥珀酸喂养后清远麻鸡腹部脂肪组织中 A-FABP 的 mRNA 表达量显著下降,但对清远麻鸡的腹脂率无显著影响。因此,饲料添加琥珀酸虽导致腹部脂肪组织中 A-FABP 的 mRNA 表达降低,但未对清远麻鸡腹脂率产生显著影响,依然能保证清远麻鸡的屠宰性能。

综上所述,在本试验条件下,饲料添加琥珀酸可提高清远麻鸡的胸肌率,并增加胸肌嫩度,改善清远麻鸡的屠宰性能和肉品质,且对生长性能无负面影响。本文为琥珀酸在清远麻鸡生产中的推广应用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] GOU Z, ABOUELEZZ K F M, FAN Q, et al. Physiological effects of transport duration on stress biomarkers and meat quality of medium-growing Yellow broiler chickens [J]. *Animal*, 2021, 15 (2): 100079.
- [2] LI L, ABOUELEZZ K F M, GOU Z, et al. Optimization of dietary zinc requirement for broiler breeder hens of Chinese yellow-feathered chicken [J]. *Animals (Basel)*, 2019, 9 (7): 472-472.
- [3] KANG H, LI S, LI H, et al. Genetic parameters and direct and maternal effects for important traits in late-feathering Qingyuan partridge hens in China [J]. *J Anim Breed Genet*, 2021, 138 (4): 454-462.
- [4] DU Y F, DING Q L, LI Y M, et al. Identification of differentially expressed genes and pathways for myofiber characteristics in soleus muscles between chicken breeds differing in meat quality [J]. *Anim Biotechnol*, 2017, 28 (2): 83-93.
- [5] 王一冰, 邝智祥, 张盛, 等. 3 种添加剂对 91~115 日龄清远麻鸡生长性能、抗氧化性能和肉品质的影响 [J]. *中国畜牧兽医*, 2021, 48 (8): 2787-2796.
- [6] YUAN Y, XU Y, XU J, et al. Succinate promotes skeletal muscle protein synthesis via Erk1/2 signaling pathway [J]. *Mol Med Rep*, 2017, 16 (5): 7361-7366.
- [7] WANG T, XU Y Q, YUAN Y X, et al. Succinate induces skeletal muscle fiber remodeling via SUNCR1 signaling [J]. *EMBO Rep*, 2019, 20 (9): e47892.
- [8] 梁冰清. 琥珀酸对肌肉生长和猪肉品质的影响 [D]. 广州: 华

- 南农业大学, 2018.
- [9] 刘佳鑫, 曾宇贤, 张丽, 等. 日粮中添加琥珀酸对 AA 肉鸡生产性能和肠道健康的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60 (3): 212-219.
- [10] 黄炜乾, 范文胜, 林万华, 等. 后生元对清远麻鸡生长性能、免疫功能 and 血清生化指标的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60 (10): 303-310.
- [11] 王春平, 吴飞. N-氨甲酰谷氨酸对快大型肉鸡生长性能、血清生化指标、屠宰性能及肌肉品质的影响 [J]. 动物营养学报, 2020, 32 (6): 2631-2637.
- [12] BERRI C, WACRENIER N, MILLET N, et al. Effect of selection for improved body composition on muscle and meat characteristics of broilers from experimental and commercial lines [J]. *Poult Sci*, 2001, 80 (7): 833-838.
- [13] VAROL AVCILAR Ö, YALÇIN S, ONBAŞILAR E E, et al. Comparison of slaughter yields and some meat quality parameters in broilers reared on sepiolite-supplemented wood shavings and rice hulls [J]. *Poult Sci*, 2019, 98 (4): 1678-1683.
- [14] BONNY S P F, GARDNER G E, PETHICK D W, et al. Biochemical measurements of beef are a good predictor of untrained consumer sensory scores across muscles [J]. *Animal*, 2015, 9 (1): 179-190.
- [15] COSTA P, LEMOS J P, LOPES P A, et al. Effect of low-and high-forage diets on meat quality and fatty acid composition of Alentejana and Barrosã beef breeds [J]. *Animal*, 2012, 6 (7): 1187-1197.
- [16] OKEUDO N J, MOSS B W. Interrelationships amongst carcass and meat quality characteristics of sheep [J]. *Meat Sci*, 2005, 69 (1): 1-8.
- [17] ZHAO S, MA H, ZOU S, et al. Hepatic lipogenesis in broiler chickens with different fat deposition during embryonic development [J]. *J Vet Med Ser A*, 2007, 54 (1): 1-6.
- [18] BERTOLIO R, NAPOLETANO F, MANO M, et al. Sterol regulatory element binding protein 1 couples mechanical cues and lipid metabolism [J]. *Nat Commun*, 2019, 10 (1): 1326.
- [19] JEON T I, OSBORNE T F. SREBPs: metabolic integrators in physiology and metabolism [J]. *Trends Endocrinol Metab*, 2012, 23 (2): 65-72.
- [20] 李良华. 3 个亲本品种和 4 个杂交猪种肌肉的组织生化研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
- [21] ABUMRAD N, COBURN C, IBRAHIMI A. Membrane proteins implicated in long-chain fatty acid uptake by mammalian cells: CD36, FATP and FABPm [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1999, 1441 (1): 4-13.
- [22] SHU L, HOO R L C, WU X, et al. A-FABP mediates adaptive thermogenesis by promoting intracellular activation of thyroid hormones in brown adipocytes [J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14147.
- [23] SHI H, WANG Q, ZHANG Q, et al. Tissue expression characterization of chicken adipocyte fatty acid-binding protein and its expression difference between fat and lean birds in abdominal fat tissue [J]. *Poult Sci*, 2010, 89 (2): 197-202.