

阿魏酸对白羽肉鸡生长性能、屠宰性能、肉品质、肌肉质构特性和血清生化指标的影响

李响 尹月 张喜闻 王敏 王永芳 赵玉蓉*

(湖南农业大学动物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要: 本试验旨在研究饲料中添加不同水平阿魏酸对白羽肉鸡生长性能、屠宰性能、肉品质、肌肉质构特性和血清生化指标的影响。选用1日龄健康、体重相近的爱拔益加(AA)肉公雏240只,随机分为4组,每组6个重复,每个重复10只鸡。对照组饲喂基础饲料,试验组分别在基础饲料中添加100、300和600 mg/kg阿魏酸。试验期42 d。结果表明:1)与对照组相比,100和300 mg/kg阿魏酸添加组1~21日龄料重比显著降低($P<0.05$)。2)与对照组相比,各阿魏酸添加组全净膛率和胸肌率均显著提高($P<0.05$),腹脂率均显著降低($P<0.05$)。3)与对照组相比,各阿魏酸添加组胸肌黄度(b^*)值均显著降低($P<0.05$);300 mg/kg阿魏酸添加组胸肌屠宰后45 min pH($pH_{45\text{ min}}$)显著提高($P<0.05$);300和600 mg/kg阿魏酸添加组胸肌屠宰后24 h pH($pH_{24\text{ h}}$)显著提高($P<0.05$),胸肌失水率显著降低($P<0.05$)。4)与对照组相比,各阿魏酸添加组腿肌红度(a^*)值和 $pH_{45\text{ min}}$ 均显著提高($P<0.05$),24 h滴水损失均显著降低($P<0.05$);300 mg/kg阿魏酸添加组腿肌剪切力显著降低($P<0.05$)。5)与对照组相比,各阿魏酸添加组胸肌黏附性、内聚性和咀嚼性均显著提高($P<0.05$);100 mg/kg阿魏酸添加组胸肌弹性显著提高($P<0.05$);300和600 mg/kg阿魏酸添加组胸肌胶黏性显著提高($P<0.05$)。6)与对照组相比,300 mg/kg阿魏酸添加组腿肌硬度显著降低($P<0.05$);100和300 mg/kg阿魏酸添加组腿肌黏附性显著提高($P<0.05$);100和600 mg/kg阿魏酸添加组腿肌内聚性显著提高($P<0.05$)。7)与对照组相比,各阿魏酸添加组血清甘油三酯(TG)含量均显著降低($P<0.05$);100和600 mg/kg阿魏酸添加组血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量和乳酸脱氢酶(LDH)活性显著降低($P<0.05$);300和600 mg/kg阿魏酸添加组血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量显著提高($P<0.05$),血清肌酸激酶(CK)活性显著降低($P<0.05$)。综上所述,饲料中添加适宜水平的阿魏酸可以降低AA肉鸡生长前期的料重比,提高全净膛率和胸肌率,降低腹脂率和血清TG含量,对肉品质和肌肉质构特性有一定的改善作用;本试验条件下,白羽肉鸡饲料中阿魏酸的适宜添加水平为300 mg/kg。

关键词: 阿魏酸;白羽肉鸡;生长性能;屠宰性能;肉品质;质构特性;血清生化指标

中图分类号: S816.7

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2024)02-0921-14

近年来,随着生活水平的提高,人们对优质畜禽产品的需求量不断增大。鸡肉是居民蛋白质消费的主要来源之一,在满足营养需要的基础上,鸡

肉品质及风味已成为消费者追求的目标,但随着快速生长肉鸡品系的选育,鸡肉品质严重下降。例如:发生在快大型肉鸡中的木质化鸡胸肉、白色

收稿日期:2023-09-19

基金项目:国家自然科学基金联合基金(U22A20515)

作者简介:李响(1999—),男,河南新乡人,硕士研究生,从事单胃动物营养研究。E-mail: 2622387421@qq.com

*通信作者:赵玉蓉,教授,博士生导师,E-mail: 1335434506@qq.com

条纹肉和意大利面条肉等给家禽养殖业造成了巨大的经济损失^[1]。所以,在采用营养手段提高肉鸡生长性能的同时,改善其肌肉品质,具有重要意义。

阿魏酸是一种天然活性物质,属于多酚类酚酸,是阿魏、当归及川芎等中药材的有效成分之一,广泛存在于水果、蔬菜等各种植物的细胞壁中^[2-3],具有抗氧化、抗炎、抑菌、调节糖脂代谢和肠道菌群等生物学功能^[4-8]。Shu 等^[9]研究发现,饲料中添加适量的阿魏酸可显著提高天府肉鸡的平均日增重(ADG),降低料重比(F/G)。Tang 等^[10]研究表明,饲料中添加适量阿魏酸可改善脂多糖(LPS)诱导的肉鸡肠道形态,调节肠道微生物群落结构。赖世雄等^[11]采用阿魏酸溶液浸泡肉鸡种蛋,结果发现显著提高了1日龄肉鸡血清超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性,降低了血清丙二醛(MDA)含量。王林林等^[12]用阿魏酸酯酶酶化发酵饲料饲喂黄脚麻鸡,结果发现提高了肉鸡的平均日增重,降低了料重比。Seven^[13]将富含阿魏酸的蜂胶添加至蛋鸡饲料中,结果表明蛋鸡的产蛋率和蛋重显著提高。Liu 等^[14]研究表明,在临武鸭饲料中添加适量的阿魏酸可显著提高临武鸭的末重和平均日增重。此外,有研究表明,阿魏酸可以通过提高机体的抗氧化能力和改善肌纤维形态等途径进而改善畜禽肉品质^[15-18]。目前,阿魏酸在畜禽上的应用已有较多研究,但不同学者在不同动物上得出的结论不一致,且针对阿魏酸对白羽肉鸡肉品质改善作用的报道比较少见。因此,本试验旨在通过在饲料中添加不同水平阿魏酸,研究其对白羽肉鸡生长性能、屠宰性能、肉品质、肌肉质构特性及血清生化指标的影响,并确定阿魏酸的适宜添加水平,以期阿魏酸在优质白羽肉鸡生产上的应用及改善其肌肉品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验动物及材料

试验鸡为爱拔益加(AA)肉公雏,由湖南某育种公司提供;阿魏酸纯度 $\geq 99\%$,由上海某生物科技有限公司提供。

1.2 试验设计和饲料

采用单因素试验设计,选择体重相近和精神状态良好的1日龄AA肉公雏240只进行随机分

组,根据饲料不同分为4个组,每组6个重复,每个重复10只鸡。对照组饲喂基础饲料,试验组饲喂在基础饲料中分别添加100、300和600 mg/kg阿魏酸的试验饲料。试验期42 d。根据《鸡饲养标准》(NY/T 33—2004)和《中国饲料成分及营养价值表》(2020年第31版)配制玉米-豆粕型基础饲料,其组成及营养水平见表1。

表1 基础饲料组成及营养水平(风干基础)

项目 Items	1~21 日龄 1 to 21 days of age	22~42 日龄 22 to 42 days of age
原料 Ingredients		
玉米 Corn	54.32	57.28
豆粕 Soybean meal	37.35	33.68
大豆油 Soybean oil	3.99	5.15
赖氨酸 Lys	0.17	0.08
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.18	0.10
磷酸氢钙 CaHPO ₄	1.59	1.39
石粉 Limestone	1.10	1.02
氯化钠 NaCl	0.30	0.30
预混料 Premix ¹⁾	1.00	1.00
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ²⁾		
代谢能 ME/(MJ/kg)	12.54	12.96
粗蛋白质 CP	21.50	19.52
赖氨酸 Lys	1.16	1.02
蛋氨酸 Met	0.58	0.59
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.93	0.91
钙 Ca	1.00	0.95
总磷 TP	0.69	0.65
有效磷 AP	0.45	0.40

1) 预混料为每千克饲料提供 The premix provided the following per kg of diets: VA 8 000 IU, VD₃ 2 000 IU, VE 20 IU, VK₃ 15 mg, VB₁ 2.25 mg, VB₂ 8.20 mg, VB₆ 2.80 mg, VB₁₂ 0.015 mg, 叶酸 folic acid 0.95 mg, 烟酸 nicotinic acid 35 mg, 泛酸 pantothenic acid 10 mg, 生物素 biotin 0.18 mg, 氯化胆碱 choline chloride 700 mg, Mn (as manganese sulfate) 80 mg, Fe (as ferrous sulfate) 80 mg, Zn (as zinc sulfate) 100 mg, Cu (as copper sulfate) 9 mg, Se (as sodium selenite) 0.30 mg, I (as potassium iodide) 0.40 mg。

2) 代谢能、有效磷和氨基酸为计算值(参考 NY/T 33—2004),其余为实测值。ME, AP and amino acids were calculated values according to NY/T 33—2004, while the others were measured values.

1.3 饲养管理

试验肉鸡采用3层笼养的方式饲养,在试验前对鸡舍和笼具进行清洗消毒,然后用福尔马林和高锰酸钾进行熏蒸、通风。入雏前将鸡舍升温至32~35℃,此后温度每周降低2~3℃,直至保持在20~22℃;鸡舍相对湿度保持在50%~60%。日常管理参照《商品肉鸡生产技术规程》(GB/T 19664—2005),试验鸡先饮水后开食,自由采食和饮水,按常规免疫。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 饲料营养成分

饲料中粗蛋白质、钙和总磷含量分别参照《饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法》(GB/T 6432—2018)、《饲料中钙的测定》(GB/T 6436—2018)和《饲料中总磷的测定 分光光度法》(GB/T 6437—2018)方法进行测定。

1.4.2 生长性能

分别于1、21和42日龄时,以重复为单位称量白羽肉鸡的体重,每天记录各个重复的耗料量,计算各个时期的平均日增重、平均日采食量和料重比。

1.4.3 屠宰性能

于42日龄时,从每个重复选取1只体重接近该重复平均体重的肉鸡进行屠宰试验,进行屠宰试验前给肉鸡禁食12 h,记录宰前活重、屠体重、全净膛重、胸肌重、腿肌重和腹脂重,计算全净膛率、胸肌率、腿肌率和腹脂率。具体测定方法参照《家禽生产性能名词术语和度量计算方法》(NY/T 823—2020)。

1.4.4 肉品质和肌肉质构特性

于42日龄时,从每个重复选取1只体重接近该重复平均体重的肉鸡,采集其右侧胸肌和腿肌样品,参照《畜禽肉质的测定》(NY/T 1333—2007)测定肉品质。肌肉质构特性采用质构分析仪(TMS-Touch型,美国FTC公司)进行测定,每个样品重复测定3次。

1.4.5 血清生化指标

于42日龄时,从每个重复选取1只体重接近该重复平均体重的肉鸡进行翅静脉采血,4 000 r/min离心10 min,分离血清,于-20℃保存

待测。采用全自动生化分析仪测定血清中谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)和碱性磷酸酶(ALP)活性以及总蛋白(TP)、葡萄糖(GLU)、总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量,采用酶标仪测定血清中肌酸激酶(CK)和乳酸脱氢酶(LDH)活性,试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。

1.5 数据统计分析

采用SPSS 22软件对试验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用Duncan氏法进行多重比较,同时采用回归分析模型对阿魏酸添加水平与各检测指标进行线性和二次曲线回归分析,结果以平均值和均值标准误(SEM)表示, $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 阿魏酸对白羽肉鸡生长性能的影响

由表2可知,各组间1~21日龄平均日采食量和平均日增重无显著差异($P>0.05$)。但与对照组相比,饲料中添加100和300 mg/kg阿魏酸可显著降低1~21日龄料重比($P<0.05$);其中300 mg/kg阿魏酸添加组1~21日龄料重比最低,且显著低于100 mg/kg阿魏酸添加组($P<0.05$)。各组间22~42日龄及1~42日龄平均日采食量、平均日增重和料重比均无显著差异($P>0.05$)。随着饲料中阿魏酸添加水平的提高,1~21日龄料重比呈线性和二次变化($P<0.05$)。

2.2 阿魏酸对白羽肉鸡屠宰性能的影响

由表3可知,饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡全净膛率、胸肌率和腹脂率存在显著影响($P<0.05$)。与对照组相比,饲料中添加100、300和600 mg/kg阿魏酸均可显著提高白羽肉鸡全净膛率和胸肌率($P<0.05$),显著降低其腹脂率($P<0.05$);其中600 mg/kg阿魏酸添加组全净膛率显著高于100和300 mg/kg阿魏酸添加组($P<0.05$)。各组间腿肌率无显著差异($P>0.05$)。随着饲料中阿魏酸添加水平的提高,白羽肉鸡全净膛率呈线性变化($P<0.05$),且胸肌率和腹脂率呈线性和二次变化($P<0.05$)。

表 2 阿魏酸对白羽肉鸡生长性能的影响

Table 2 Effects of ferulic acid on growth performance of white feather broilers

项目 Items	日龄 Days of age	对照组 Control group	阿魏酸添加水平 Ferulic acid supplemental levels/(mg/kg)			均值 标准误 SEM	P 值 P-value		
			100	300	600		处理 Treatment	线性 Linear	二次 Quadratic
体重 BW/g	1	46.58	46.62	46.56	46.54	0.026	0.764	0.476	0.608
	21	788.67	805.00	843.00	819.50	7.502	0.057	0.041	0.152
	42	2 671.30	2 651.85	2 702.78	2 647.06	17.418	0.692	0.894	0.620
平均日采食量 ADFI/(g/d)	1~21	50.10	50.54	49.34	50.42	0.390	0.725	0.951	0.698
	22~42	157.12	153.38	155.79	151.12	1.170	0.289	0.144	0.842
	1~42	103.61	101.60	102.57	100.62	0.673	0.460	0.202	0.980
平均日增重 ADG/(g/d)	1~21	35.34	36.11	37.93	36.81	0.358	0.057	0.041	0.153
	22~42	89.65	87.95	89.26	87.03	0.746	0.608	0.349	0.865
	1~42	62.49	63.24	64.14	62.29	0.361	0.265	0.929	0.079
料重比 F/G	1~21	1.42 ^a	1.36 ^b	1.31 ^c	1.37 ^{ab}	0.011	0.002	0.021	0.002
	22~42	1.76	1.75	1.75	1.74	0.011	0.960	0.604	0.945
	1~42	1.66	1.61	1.60	1.62	0.010	0.147	0.118	0.085

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$), 肩标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下表同。

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

表 3 阿魏酸对白羽肉鸡屠宰性能的影响

Table 3 Effects of ferulic acid on slaughter performance of white feather broilers

%

项目 Items	对照组 Control group	阿魏酸添加水平 Ferulic acid supplemental levels/(mg/kg)			均值 标准误 SEM	P 值 P-value		
		100	300	600		处理 Treatment	线性 Linear	二次 Quadratic
全净膛率 All eviscerated rate	69.88 ^c	72.67 ^b	72.19 ^b	74.10 ^a	0.358	<0.001	<0.001	0.243
胸肌率 Breast muscle rate	29.45 ^b	30.89 ^a	30.86 ^a	30.68 ^a	0.206	0.028	0.032	0.033
腿肌率 Leg muscle rate	21.42	21.38	21.46	20.42	0.179	0.107	0.061	0.146
腹脂率 Abdominal fat rate	0.72 ^a	0.41 ^b	0.39 ^b	0.46 ^b	0.046	0.029	0.036	0.027

2.3 阿魏酸对白羽肉鸡肉品质的影响

由表 4 可知, 饲料中添加不同水平阿魏酸对白羽肉鸡胸肌亮度 (L^*) 和红色 (a^*) 值以及 24 h 滴水损失和剪切力均无显著影响 ($P>0.05$)。与对照组相比, 饲料中添加 100、300 和 600 mg/kg 阿魏酸均可显著降低胸肌黄度 (b^*) 值 ($P<0.05$), 其中 600 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌黄度值显著低于 100 和 300 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P<0.05$), 而 100 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌黄度值显著低于 300 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P<0.05$); 胸肌黄度值随饲料中阿魏酸添加水平的提高呈线性变化 ($P<0.05$)。与对照组相比, 饲料中添加 300 和 600 mg/kg 阿魏酸可显著提高胸肌屠宰后 24 h pH

(pH_{24h}) ($P<0.05$), 其中 300 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌 pH_{24h} 显著高于 100 和 600 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P<0.05$), 而 600 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌 pH_{24h} 显著高于 100 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P<0.05$); 胸肌 pH_{24h} 随饲料中阿魏酸添加水平的提高呈线性变化 ($P<0.05$)。与对照组相比, 饲料中添加 300 和 600 mg/kg 阿魏酸可显著降低胸肌失水率 ($P<0.05$), 且胸肌失水率随饲料中阿魏酸添加水平的提高呈线性变化 ($P<0.05$)。与对照组相比, 饲料中添加 300 mg/kg 阿魏酸可显著提高胸肌屠宰后 45 min pH (pH_{45min}) ($P<0.05$), 且 100 和 300 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌 pH_{45min} 显著高于 600 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P<0.05$); 胸肌 pH_{45min}

随饲料中阿魏酸添加水平的提高呈二次变化($P < 0.05$)。

表 4 阿魏酸对白羽肉鸡胸肌肉品质的影响

Table 4 Effects of ferulic acid on breast muscle quality of white feather broilers

项目 Items	对照组 Control group	阿魏酸添加水平 Ferulic acid supplemental levels/(mg/kg)			均值 标准误 SEM	P 值 P-value		
		100	300	600		处理 Treatment	线性 Linear	二次 Quadratic
亮度 L [*]	53.87	52.32	51.41	53.59	0.537	0.349	0.714	0.094
红度 a [*]	6.99	7.54	7.39	7.02	0.142	0.463	0.954	0.127
黄度 b [*]	12.38 ^a	10.03 ^c	11.18 ^b	8.24 ^d	0.338	<0.001	<0.001	0.238
pH _{45 min}	6.71 ^{bc}	6.77 ^{ab}	6.87 ^a	6.63 ^c	0.025	0.001	0.373	0.001
pH _{24 h}	5.97 ^c	6.01 ^c	6.30 ^a	6.15 ^b	0.035	<0.001	0.001	0.062
24 h 滴水损失 Drop loss at 24 h/%	2.02	1.44	1.29	1.79	0.126	0.163	0.448	0.036
失水率 Water loss rate/%	35.85 ^a	34.61 ^{ab}	32.13 ^b	31.76 ^b	0.561	0.015	0.002	0.643
剪切力 Shear force/N	15.96	12.12	15.64	16.43	0.699	0.104	0.402	0.087

由表 5 可知,饲料中添加不同水平阿魏酸对白羽肉鸡腿肌亮度和黄度值以及 pH_{24 h} 和失水率均无显著影响($P > 0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 100、300 和 600 mg/kg 阿魏酸均可显著提高腿肌红度值和 pH_{45 min} ($P < 0.05$),显著降低腿肌 24 h 滴水损失 ($P < 0.05$);其中 100 和 300 mg/kg 阿魏酸添加组腿肌 pH_{45 min} 显著高于 600 mg/kg 阿

魏酸添加组 ($P < 0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 300 mg/kg 阿魏酸可显著降低腿肌剪切力 ($P < 0.05$),且 300 mg/kg 阿魏酸添加组腿肌剪切力显著低于 100 和 600 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P < 0.05$)。随着饲料中阿魏酸添加水平的提高,腿肌 pH_{45 min}、24 h 滴水损失和剪切力呈线性和二次变化 ($P < 0.05$),腿肌红度值呈二次变化 ($P < 0.05$)。

表 5 阿魏酸对白羽肉鸡腿肌肉品质的影响

Table 5 Effects of ferulic acid on leg muscle quality of white feather broilers

项目 Items	对照组 Control group	阿魏酸添加水平 Ferulic acid supplemental levels/(mg/kg)			均值 标准误 SEM	P 值 P-value		
		100	300	600		处理 Treatment	线性 Linear	二次 Quadratic
亮度 L *	58.41	56.43	55.73	55.88	0.455	0.129	0.041	0.223
红度 a *	8.45 ^b	10.80 ^a	10.43 ^a	10.02 ^a	0.300	0.019	0.070	0.013
黄度 b *	10.72	10.77	10.56	10.80	0.212	0.982	0.990	0.835
pH _{45 min}	6.39 ^c	6.62 ^a	6.64 ^a	6.50 ^b	0.025	<0.001	0.008	<0.001
pH _{24 h}	6.42	6.42	6.45	6.46	0.013	0.533	0.179	0.941
24 h 滴水损失 Drop loss at 24 h/%	1.58 ^a	0.99 ^b	0.71 ^b	0.95 ^b	0.095	0.003	0.003	0.011
失水率 Water loss rate/%	37.47	35.33	34.86	35.80	0.383	0.075	0.094	0.038
剪切力 Shear force/N	20.04 ^a	20.70 ^a	14.14 ^b	18.90 ^a	0.625	<0.001	0.004	0.008

2.4 饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡质构特性的影响

由表 6 可知,饲料中添加不同水平阿魏酸对白羽肉鸡胸肌硬度无显著影响($P > 0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 100、300 和 600 mg/kg 阿魏酸均可显著提高胸肌黏附性、内聚性和咀嚼性 ($P <$

0.05),其中 600 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌黏附性显著高于 100 和 300 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P < 0.05$),且 100 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌黏附性显著高于 300 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P < 0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 100 mg/kg 阿魏酸可显著

提高胸肌弹性($P<0.05$),且 100 mg/kg 阿魏酸添加组胸肌弹性显著高于 300 和 600 mg/kg 阿魏酸添加组($P<0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 300 和 600 mg/kg 阿魏酸可显著提高胸肌胶黏性($P<0.05$),且 300 和 600 mg/kg 阿魏酸添加组胸

肌胶黏性显著高于 100 mg/kg 阿魏酸添加组($P<0.05$)。随着饲料中阿魏酸添加水平的提高,胸肌黏附性、胶黏性和咀嚼性呈线性变化($P<0.05$),胸肌内聚性呈线性和二次变化($P<0.05$),胸肌弹性呈二次变化($P<0.05$)。

表 6 阿魏酸对白羽肉鸡胸肌质构特性的影响

Table 6 Effects of ferulic acid on breast muscle texture characteristics of white feather broilers

项目 Items	对照组 Control group	阿魏酸添加水平 Ferulic acid supplemental levels/(mg/kg)			均值 标准误 SEM	P 值 P-value		
		100	300	600		处理 Treatment	线性 Linear	二次 Quadratic
硬度 Hardness/N	24.48	20.10	27.24	25.52	1.076	0.102	0.262	0.510
黏附性 Adhesion/N	0.15 ^d	0.26 ^b	0.21 ^c	0.33 ^a	0.015	<0.001	<0.001	0.644
内聚性 Cohesiveness/N	0.21 ^b	0.27 ^a	0.28 ^a	0.26 ^a	0.007	0.002	0.003	0.005
弹性 Springiness/mm	1.01 ^b	1.22 ^a	1.07 ^b	1.11 ^b	0.023	0.003	0.427	0.025
胶黏性 Gumminess/N	5.36 ^b	7.78 ^b	11.38 ^a	11.46 ^a	0.696	<0.001	<0.001	0.233
咀嚼性 Chewiness/mJ	4.79 ^b	9.76 ^a	11.00 ^a	12.36 ^a	0.739	<0.001	<0.001	0.069

由表 7 可知,饲料中添加不同水平阿魏酸对白羽肉鸡腿肌弹性、胶黏性和咀嚼性均无显著影响($P>0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 300 mg/kg 阿魏酸可显著降低腿肌硬度($P<0.05$),且 300 mg/kg 阿魏酸添加组腿肌硬度显著低于 100 mg/kg 阿魏酸添加组($P<0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 100 和 300 mg/kg 阿魏酸可显著提高腿肌黏附性($P<0.05$),且 100 和

300 mg/kg 阿魏酸添加组腿肌黏附性显著高于 600 mg/kg 阿魏酸添加组($P<0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 100 和 600 mg/kg 阿魏酸可显著提高腿肌内聚性($P<0.05$),饲料中添加 300 mg/kg 阿魏酸对腿肌内聚性无显著影响($P>0.05$)。随着饲料中阿魏酸添加水平的提高,腿肌硬度和内聚性呈线性变化($P<0.05$),腿肌黏附性呈二次变化($P<0.05$)。

表 7 阿魏酸对白羽肉鸡腿肌质构特性的影响

Table 7 Effects of ferulic acid on leg muscle texture characteristics of white feather broilers

项目 Items	对照组 Control group	阿魏酸添加水平 Ferulic acid supplemental levels/(mg/kg)			均值 标准误 SEM	P 值 P-value		
		100	300	600		处理 Treatment	线性 Linear	二次 Quadratic
硬度 Hardness/N	76.14 ^a	71.34 ^a	54.48 ^b	63.84 ^{ab}	2.556	0.007	0.008	0.098
黏附性 Adhesion/N	0.19 ^b	0.21 ^a	0.22 ^a	0.19 ^b	0.003	0.007	0.523	0.001
内聚性 Cohesiveness/N	0.32 ^b	0.37 ^a	0.34 ^{ab}	0.37 ^a	0.007	0.016	0.030	0.365
弹性 Springiness/mm	1.14	1.13	1.21	0.96	0.037	0.106	0.167	0.095
胶黏性 Gumminess/N	25.06	27.84	28.92	24.81	1.044	0.436	0.973	0.116
咀嚼性 Chewiness/mJ	30.37	28.94	29.33	22.47	1.264	0.100	0.037	0.257

2.5 阿魏酸对白羽肉鸡血清生化指标的影响

由表 8 可知,饲料中添加不同水平阿魏酸对白羽肉鸡血清 ALT、AST 和 ALP 活性以及 TP、GLU 和 TC 含量均无显著影响($P>0.05$)。与对照

组相比,饲料中添加 100、300 和 600 mg/kg 阿魏酸均可显著降低血清 TG 含量($P<0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 100 和 600 mg/kg 阿魏酸可显著降低血清 LDL-C 含量和 LDH 活性($P<$

0.05),且 100 和 600 mg/kg 阿魏酸添加组血清 LDH 活性显著低于 300 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P<0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 300 和 600 mg/kg 阿魏酸可显著提高血清 HDL-C 含量 ($P<0.05$),显著降低血清 CK 活性 ($P<0.05$),且 300 mg/kg 阿魏酸添加组血清 HDL-C 含量显著高

于 100 mg/kg 阿魏酸添加组 ($P<0.05$);饲料中添加 100 mg/kg 阿魏酸对血清 CK 活性无显著影响 ($P>0.05$)。随着饲料中阿魏酸添加水平的提高,血清 TG 和 HDL-C 含量以及 CK 活性呈线性和二次变化 ($P<0.05$)。

表 8 阿魏酸对白羽肉鸡血清生化指标的影响

Table 8 Effects of ferulic acid on serum biochemical indices of white feather broilers

项目 Items	对照组 Control group	阿魏酸添加水平 Ferulic acid supplemental levels/(mg/kg)			均值 标准误 SEM	P 值 P-value		
						处理 Treatment	线性 Linear	二次 Quadratic
		100	300	600				
谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	5.10	5.41	4.94	4.80	0.103	0.178	0.134	0.259
谷草转氨酶 AST/(U/L)	486.95	463.82	505.98	405.82	26.103	0.585	0.409	0.479
碱性磷酸酶 ALP/(U/L)	2 116.65	2 337.18	2 900.75	2 489.05	192.889	0.559	0.351	0.431
总蛋白 TP/(g/L)	31.68	32.03	31.93	31.27	0.392	0.918	0.721	0.552
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	11.45	11.86	11.54	12.02	0.174	0.652	0.403	0.922
总胆固醇 TC/(mmol/L)	3.48	3.19	3.00	3.20	0.071	0.126	0.104	0.084
甘油三酯 TG/(mmol/L)	0.69 ^a	0.47 ^b	0.54 ^b	0.53 ^b	0.023	0.001	0.011	0.002
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/(mmol/L)	3.14 ^c	3.43 ^{bc}	4.00 ^a	3.67 ^{ab}	0.092	0.002	0.003	0.036
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/(mmol/L)	0.72 ^a	0.57 ^b	0.63 ^{ab}	0.58 ^b	0.021	0.044	0.043	0.191
肌酸激酶 CK/(U/mL)	2.47 ^a	2.34 ^{ab}	2.44 ^b	2.74 ^b	0.051	0.033	0.037	0.031
乳酸脱氢酶 LDH/(U/mL)	12.70 ^a	11.36 ^b	12.59 ^a	11.48 ^b	0.206	0.018	0.132	0.750

3 讨 论

3.1 饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡生长性能的影响

天然植物多酚对动物的生长性能有很好的改善作用,而评估肉鸡饲养经济效益最直观的指标就是生长性能,在实际生产中,料重比越低,说明其生长性能越好。本试验研究表明,饲料中添加 100 和 300 mg/kg 阿魏酸可显著降低白羽肉鸡生长前期的料重比,说明添加适宜水平的阿魏酸可以促进白羽肉鸡前期的饲料转化效率,带来可视化的经济效益。Du 等^[19]研究表明,在肉鸡饲料中添加适量阿魏酸可显著增加肉鸡前期平均日增重,显著降低前期料重比。Lin 等^[20]在肉鸡饲料中添加富含阿魏酸的假木霉发酵酶粉,结果也发现肉鸡前期的料重比显著降低。Kim 等^[21]研究表明,在肉鸡饲料中添加适量阿魏酸可使肉鸡料重比显著降低,平均日增重显著提高。Shu 等^[9]通过

试验也得到了类似的结果。本试验结果与以上研究结果基本相似,在本试验中,饲料中添加阿魏酸只降低了白羽肉鸡前期料重比,这说明阿魏酸对畜禽生长性能的影响可能与动物品种、生长阶段以及生理状况有关。阿魏酸对肉鸡生长发育具有促进作用,其原因可能是阿魏酸与肠道健康息息相关,肠道是动物营养物质消化吸收的主要场所,在饲料中添加阿魏酸不仅可以增强动物肠道消化酶活性,促进饲料中营养物质的消化吸收^[22];还可以改善肠道形态、降低肠道通透性^[10]、增强肠道抗氧化能力和调节肠道微生物群落组成^[23-25],从而促进肠道健康和动物机体生长。

3.2 饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡屠宰性能的影响

肉鸡的屠宰性能是生产实践中衡量生产效益的一个重要指标,在饲料中添加天然功能活性物质已成为提高肉鸡胴体品质的常见措施。本试验结果表明,饲料中添加阿魏酸可显著提高白羽肉

鸡的全净膛率和胸肌率。阿魏酸属于植物多酚的一种,徐自强等^[26]研究表明,饲料中添加月桂酸可显著提高肉鸡的屠宰率和全净膛率。吴涛等^[27]和陈露等^[28]在肉鸡饲料中分别添加单宁酸和迷迭香酸后均发现肉鸡胸肌率显著提高。本试验结果与上述研究结果类似。此外,黄雅莉等^[29]研究表明,茶多酚主要通过降脂作用提高肉鸡的全净膛率和胸肌率。李焱等^[30]也研究表明,饲料中添加沙棘黄酮能提高肉鸡屠宰率,并且降低肉鸡腹脂率和血清 TG 含量。Valenzuela-Grijalva 等^[31]研究表明,饲料中添加适量的阿魏酸可显著提高育肥猪眼肌面积,降低背膘厚度。以上研究结果表明,阿魏酸可能是通过降低白羽肉鸡体内脂肪的沉积,改善肉鸡的脂质代谢进而提高全净膛率和胸肌率。与上述研究结果类似,本试验结果表明,饲料中添加阿魏酸可显著降低白羽肉鸡腹脂率。此外,饲料中添加阿魏酸可以提高肉鸡肠道消化酶的活性和营养转运蛋白的表达,从而提高机体对营养物质的消化吸收和利用,促进机体蛋白质的合成与沉积^[28]。因此,阿魏酸可以改善白羽肉鸡的屠宰性能,其机理可能与脂质代谢的改善和蛋白质的合成与沉积相关。

3.3 饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡肉品质和肌肉质构特性的影响

白羽肉鸡经过长期选育,其生长速度和产肉水平显著提高,但普遍存在一些肌肉缺陷问题,严重影响鸡肉品质。质构特性与肉品质密切相关。研究表明,AA 肉鸡肌纤维直径与剪切力呈正相关,而剪切力又与硬度和嫩度密切相关^[32]。本试验结果表明,饲料中添加 300 mg/kg 阿魏酸可使白羽肉鸡腿肌剪切力和硬度显著降低。这与董谭琴等^[33]发现牦牛背最长肌硬度与剪切力呈正相关的研究结果类似。李黎云^[34]研究表明,饲料中添加适量的阿魏酸可显著降低育肥猪背最长肌的剪切力,但对其肌肉质构特性无显著影响。这一研究结果与本试验研究结果不一致,这可能是因为动物品种的不同。而王述浩^[35]研究表明,在肉鸡饲料中添加适量的万寿菊提取物可显著降低其肌肉硬度。钱旺等^[36]也研究发现,饲料中添加糖萜素可显著降低肉鹅的肌肉硬度。张安青^[37]研究表明,饲料中添加杜仲水提物能提高虹鳟肌肉弹性、胶黏性、咀嚼性和内聚性。以上研究结果与本试验结果类似。肉类中的蛋白质能与其水化层形成

网状结构,有一定抵抗外力的能力,这种抵抗力即表现为肉的弹性;内聚性反映的是咀嚼食物时食物抵抗受损的能力,并紧密连接,使食物保持完整的性质^[38];硬度的变化可能与肌肉中水分含量和蛋白质变性有关^[39];而咀嚼性与硬度、内聚性和弹性紧密相关^[40]。韦玲静等^[41]研究表明,肌肉的弹性和咀嚼性越大,肌肉越结实,口感更有嚼劲。肌肉的内聚性可用于反映肌肉细胞组织间的结合力大小。本试验结果表明,饲料中添加阿魏酸可以改善白羽肉鸡肌肉质构部分相关指标,这说明阿魏酸能够增强白羽肉鸡肌肉细胞间的结合力,使肌肉更加紧密结实,口感更有嚼劲,且对肌肉的硬度、弹性不会产生负面影响。此外,Alijošius 等^[42]研究发现,在肉鸡饲料中添加富含阿魏酸的黑小麦可以使其胸肌红度值显著提高。而 Szymczyk 等^[43]把富含阿魏酸的燕麦添加到肉鸡饲料中,结果发现可以显著降低肉鸡胸肌的黄度值。Vargas-Sánchez 等^[44]研究表明,在饲料中添加富含阿魏酸的平菇可以使日本鹌鹑胸肌红度值和 pH_{24h} 显著升高,使其胸肌黄度值显著降低。徐自强等^[26]研究表明,在肉鸡饲料中添加月桂酸可以显著降低其胸肌 48 h 滴水损失。吴琼等^[45]研究发现,饲料中添加茶多酚可使雉鸡胸肌红度值显著升高,剪切力显著降低。本试验研究结果与上述研究结果类似。研究表明,阿魏酸可以通过激活肌肉组织中核因子 E2 相关因子 2(Nrf2)-抗氧化反应元件(ARE)信号通路以及上调下游靶基因和相关蛋白的表达来增强肌肉的抗氧化能力进而改善肉品质^[34]。此外,阿魏酸可以通过上调成肌分化蛋白 1(Myod1)、肌细胞生成素(Myog)和生肌决定因子 5(Myf5)等肌源发育相关基因的表达来调节肌纤维发育^[8],还可以通过激活腺苷活化蛋白激酶(AMPK)/沉默信息调节因子 1(SIRT1)/过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活因子-1 α (PGC-1 α)信号通路上调肌球蛋白重链(MyHC) I 和 MyHC II a 等基因和相关蛋白的表达,降低 MyHC II b 等基因和蛋白的表达^[46],说明阿魏酸可以诱导肌纤维类型从快肌纤维向慢肌纤维的转化。而慢肌纤维中血红蛋白和肌红蛋白含量高^[47],所以当慢肌纤维比例高时肉色较好。pH 与肌糖原的酵解速率有关,当 II b 型肌纤维比例越高时,糖酵解能力越强,pH 越低^[48]。滴水损失和失水率表示肌肉的系水能力,刘大鹏^[49]研究表明,II b 型肌

纤维直径大,其占比越高肌纤维横截面积越大,系水力越低,肉质越差。因此,饲料中添加阿魏酸可以在一定程度上改善白羽肉鸡肉品质,这可能与阿魏酸可以诱导肌纤维类型转换和其在肌肉中的抗氧化作用有关。在本试验中,饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡胸肌和腿肌肉品质等指标的改善作用不尽相同,这可能是因为鸡胸肉是最受重视的遗传选育方向之一,由于过度选育,在生长过程中胸肌的肌肉疾病发生率要远大于腿肌^[50]。所以阿魏酸的添加对胸肌肉品质的改善效果可能更明显一些,但具体原因尚不清晰,有待进一步研究。

3.4 饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡血清生化指标的影响

血清中 ALT 和 AST 是判断肝脏损伤的重要指标,如果肝脏受到损伤,肝细胞中的转氨酶会进入血液,导致血液中 ALT 和 AST 活性提高^[51]。本试验结果表明,饲料中添加阿魏酸对白羽肉鸡血清 ALT 和 AST 活性无显著影响,说明饲料中阿魏酸的添加不会对肉鸡肝脏造成损伤。血清中 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 的含量反映脂类的吸收代谢及利用情况,与机体的脂肪代谢密切相关。Kim 等^[21]研究表明,在肉鸡饲料中添加阿魏酸可以显著降低其血清 TC 含量。Wang 等^[16]研究表明,在断奶仔猪饲料中添加阿魏酸可显著降低其血清 LDL-C 含量和肝脏 TG 含量,显著提高血清 HDL-C 含量。Jain 等^[52]研究表明,在高脂饮食诱导的高脂血症大鼠饲料中添加阿魏酸可以使大鼠血清 TC、TG 和 LDL-C 含量显著降低,使其血清 HDL-C 含量显著提高。本试验结果与上述研究结果相似,本试验结果表明,饲料中添加阿魏酸可以显著降低白羽肉鸡血清 TG 和 LDL-C 含量,显著提高血清 HDL-C 含量,说明阿魏酸的添加有利于机体的脂质代谢,这可能是因为它能够抑制机体内脂肪合成相关基因的表达,促进脂肪分解和脂肪酸 β 氧化^[53]。这也证实了阿魏酸能够通过改善脂质代谢进而提升白羽肉鸡的屠宰性能。血清中 CK 和 LDH 的活性可能与肌肉损伤有关。Kong 等^[54]研究表明,当白羽肉鸡发生肌肉疾病时,其血清中 CK 和 LDH 活性会急剧上升。Liu 等^[55]研究表明,在缺血再灌注损伤模型大鼠饲料中添加阿魏酸可显著降低模型大鼠血清中 CK 和 LDH 的活性,减轻缺血再灌注诱导的心肌损伤。本试验结果与以上研究结果类似,饲料中添加阿魏酸显著

降低了白羽肉鸡血清中 CK 和 LDH 的活性,但骨骼肌和心肌等组织以及肝脏和肾脏等器官发生损伤时,血清 CK 和 LDH 活性都会上升^[56],所以血清 CK 和 LDH 活性是否能作为检测白羽肉鸡发生肌肉损伤的标志,还有待进一步研究。

4 结 论

饲料添加阿魏酸能够改善白羽肉鸡的屠宰性能,降低其腹脂率和生长前期料重比,降低血清 TG 和 LDL-C 含量以及 CK 和 LDH 活性,提高血清 HDL-C 含量,对白羽肉鸡肉品质和肌肉质构特性均有一定的改善作用。综合料重比、胸肌率和腹脂率等各项指标,白羽肉鸡饲料中阿魏酸的适宜添加水平为 300 mg/kg。

参考文献:

- [1] CASTILHO V A R, KOMIYAMA C M, BURBARELLI M F C, et al. Precision technologies for predictive diagnosis and study of the allometric growth of broiler chickens with breast myopathies [J]. *British Poultry Science*, 2023, 64(2): 204-213.
- [2] SAEED M, ALAGAWANY M, FAZLANI S A, et al. Health promoting and pharmaceutical potential of ferulic acid for the poultry industry [J]. *World's Poultry Science Journal*, 2019, 75(1): 83-92.
- [3] 刘洋, 戴求仲, 黄兴国, 等. 阿魏酸的生物学功能及其在畜禽生产上的应用 [J]. *动物营养学报*, 2020, 32(12): 5524-5531.
LIU Y, DAI Q Z, HUANG X G, et al. Biological functions of ferulic acid and its application in livestock production [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(12): 5524-5531. (in Chinese)
- [4] ZDUŃSKA K, DANA A, KOŁODZIEJCZAK A, et al. Antioxidant properties of ferulic acid and its possible application [J]. *Skin Pharmacology and Physiology*, 2018, 31(6): 332-336.
- [5] NOURI A, GHATREH-SAMANI K, AMINI-KHOEI H, et al. Ferulic acid prevents cyclosporine-induced nephrotoxicity in rats through exerting anti-oxidant and anti-inflammatory effects via activation of Nrf2/HO-1 signaling and suppression of NF- κ B/TNF- α axis [J]. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 2022, 395(4): 387-395.
- [6] IBITOYE O B, AJIBOYE T O. Ferulic acid potentiates the antibacterial activity of quinolone-based antibiotics

- against *Acinetobacter baumannii* [J]. Microbial Pathogenesis, 2019, 126: 393–398.
- [7] TIAN B M, GENG Y, WANG P Y, et al. Ferulic acid improves intestinal barrier function through altering gut microbiota composition in high-fat diet-induced mice [J]. European Journal of Nutrition, 2022, 61 (7): 3767–3783.
- [8] YIN X Y, LIU W Y, CHEN H, et al. Effects of ferulic acid on muscle development and intestinal microbiota of zebrafish [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2022, 106 (2): 429–440.
- [9] SHU G, TANG Z T, DU H, et al. Effects of dietary ferulic acid supplementation on hepatic injuries in Tianfu broilers challenged with lipopolysaccharide [J]. Toxins, 2022, 14 (3): 227.
- [10] TANG Z T, SHU G, DU H, et al. Effects of dietary ferulic acid on intestinal health and ileal microbiota of Tianfu broilers challenged with lipopolysaccharide [J]. Molecules, 2023, 28 (4): 1720.
- [11] 赖世雄, 郑玉才, 李志雄, 等. 阿魏酸溶液浸泡肉鸡种蛋对鸡胚绒毛尿囊膜血管生成及 1 日龄肉鸡抗氧化性能的影响 [J]. 动物营养学报, 2022, 34 (5): 3392–3400.
- LAI S X, ZHENG Y C, LI Z X, et al. Effects of broiler fertilized egg soaked in ferulic acid solution on chorio-allantoic membrane angiogenesis of chicken embryo and antioxidant performance of one-day-old broiler chickens [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34 (5): 3392–3400. (in Chinese)
- [12] 王林林, 陈培钦, 罗云, 等. 阿魏酸酯酶酶化发酵饲料品质的研究及对肉鸡生产性能的影响 [J]. 动物营养学报, 2015, 27 (5): 1540–1548.
- WANG L L, CHEN P Q, LUO Y, et al. Enzymatic fermented feed by the feruloyl esterases: quality and effects on the performance of broilers [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27 (5): 1540–1548. (in Chinese)
- [13] SEVEN P T. The effects of dietary Turkish propolis and vitamin C on performance, digestibility, egg production and egg quality in laying hens under different environmental temperatures [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2008, 21 (8): 1164–1170.
- [14] LIU Y, LIN Q, HUANG X, et al. Effects of dietary ferulic acid on the intestinal microbiota and the associated changes on the growth performance, serum cytokine profile, and intestinal morphology in ducks [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 698213.
- [15] PEÑA-TORRES E F, CASTILLO-SALAS C, JIMÉNEZ-ESTRADA I, et al. Growth performance, carcass traits, muscle fiber characteristics and skeletal muscle mRNA abundance in hair lambs supplemented with ferulic acid [J]. Journal of Animal Science and Technology, 2022, 64 (1): 52–69.
- [16] WANG Y X, CHEN X L, HUANG Z Q, et al. Dietary ferulic acid supplementation improves antioxidant capacity and lipid metabolism in weaned piglets [J]. Nutrients, 2020, 12 (12): 3811.
- [17] WANG Y X, CHEN X L, HUANG Z Q, et al. Effects of dietary ferulic acid supplementation on growth performance and skeletal muscle fiber type conversion in weaned piglets [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101 (12): 5116–5123.
- [18] LI Y J, LI L Y, LI J L, et al. Effects of dietary supplementation with ferulic acid or vitamin E individually or in combination on meat quality and antioxidant capacity of finishing pigs [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2015, 28 (3): 374–381.
- [19] DU J, WANG Y, WANG R, et al. Effect of ferulic acid on growth, digestibility, digestive enzyme activity, immunity and antioxidant status of broilers [J]. South African Journal of Animal Science, 2022, 52 (3): 280–290.
- [20] LIN W C, LEE M T, LO C T, et al. Effects of dietary supplementation of *Trichoderma pseudokoningii* fermented enzyme powder on growth performance, intestinal morphology, microflora and serum antioxidative status in broiler chickens [J]. Italian Journal of Animal Science, 2018, 17 (1): 153–164.
- [21] KIM Y R, LEE S W, KIM E J. Effects of ferulic acid-based preparation on performance, carcass characteristics, blood profiles, and intestinal microflora of broiler chicks [J]. Korean Journal of Poultry Science, 2022, 49 (1): 45–51.
- [22] WAN J, YU Q, LUO J Q, et al. Effects of ferulic acid on the growth performance, antioxidant capacity, and intestinal development of piglets with intrauterine growth retardation [J]. Journal of Animal Science, 2022, 100 (5): skac144.
- [23] LIU Y K, ZHANG T, JIA F Y, et al. Effects of ferulic acid on growth performance and intestinal oxidation indexes of Jilin white geese under lipopolysaccharide-induced oxidative stress [J]. PLoS One, 2023, 18 (10): e0291955.

- [24] CHEN X L, WANG Y X, CHEN D W, et al. Dietary ferulic acid supplementation improves intestinal antioxidant capacity and intestinal barrier function in weaned piglets [J]. *Animal Biotechnology*, 2022, 33 (2): 356–361.
- [25] HU R Z, WU S S, LI B Z, et al. Dietary ferulic acid and vanillic acid on inflammation, gut barrier function and growth performance in lipopolysaccharide-challenged piglets [J]. *Animal Nutrition*, 2022, 8 (1): 144–152.
- [26] 徐自强, 刘金松, 孙耀威, 等. 月桂酸对肉鸡屠宰性能、肌肉品质和抗氧化功能的影响[J/OL]. *畜牧兽医学报*: 1–12 [2023–07–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1985.S.20230713.1010.004.html>.
XU Z Q, LIU J S, SUN Y W, et al. Effects of lauric acid on slaughter performance, muscle quality and antioxidant function of broilers [J/OL]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*: 1–12 [2023–07–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1985.S.20230713.1010.004.html>. (in Chinese)
- [27] 吴涛, 江小帆, 魏玉明, 等. 单宁酸、抗菌肽及酵母培养物对芦花鸡生长性能、屠宰性能、器官指数的影响[J]. *饲料工业*, 2022, 43 (7): 28–34.
WU T, JIANG X F, WEI Y M, et al. Effects of tannic acid, antimicrobial peptide and yeast culture on growth performance, slaughter performance and organ index of *Luhua* chickens [J]. *Feed Industry*, 2022, 43 (7): 28–34. (in Chinese)
- [28] 陈露, 赵道远, 吴建民, 等. 橙皮苷和迷迭香酸对白羽肉鸡生长性能、肉品质及抗氧化功能的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46 (4): 756–763.
CHEN L, ZHAO D Y, WU J M, et al. Combination effects of hesperidin and rosmarinic acid on growth performance, meat quality and antioxidant function in broilers [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46 (4): 756–763. (in Chinese)
- [29] 黄雅莉, 蓝铄师, 侯小露, 等. 大麻油和茶多酚对三黄鸡生长性能和屠宰性能的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2021 (16): 105–108.
HUANG Y L, LAN B S, HOU X L, et al. Effects of hemp seeds oil and tea polyphenols on the growth performance and slaughter performance of *Sanhuang* chicken [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2021 (16): 105–108. (in Chinese)
- [30] 李垚, 付晶, 王宝东, 等. 沙棘黄酮对 AA 肉仔鸡胴体和肉品质的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2008, 39 (9): 1217–1223.
- LI Y, FU J, WANG B D, et al. Effect of flavones of sea buckthorn on carcass characteristics and meat quality of arbor acres broilers [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2008, 39 (9): 1217–1223. (in Chinese)
- [31] VALENZUELA-GRUJALVA N, JIMÉNEZ-ESTRADA I, MARISCAL-TOVAR S, et al. Effects of ferulic acid supplementation on growth performance, carcass traits and histochemical characteristics of muscle fibers in finishing pigs [J]. *Animals*, 2021, 11 (8): 2455.
- [32] 蔡治华, 蔡旭冉. AA 肉鸡肌纤维直径、嫩度变化与相关性分析[J]. *中国畜牧兽医*, 2007, 34 (2): 36–38.
CAI Z H, CAI X R. Changes and correlation analysis of muscle fiber diameter and tenderness in AA broilers [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2007, 34 (2): 36–38. (in Chinese)
- [33] 董谭琴, 李红丽, 柴沙驼, 等. 不同能量和蛋白质水平饲料对牦牛肉品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2022, 34 (7): 4512–4518.
DONG T Q, LI H L, CHAI S T, et al. Effects of different dietary energy and protein levels on meat quality of yaks [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34 (7): 4512–4518. (in Chinese)
- [34] 李黎云. 日粮添加阿魏酸与维生素 E 对育肥猪肉品质和抗氧化性能的影响[D]. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学, 2013.
LI L Y. Effects of dietary supplementation of ferulic acid and vitamin E on meat quality and antioxidative capacity of finishing pigs [D]. Master's Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [35] 王述浩. 万寿菊提取物对肉鸡着色、肉质、抗氧化和免疫的影响[D]. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学, 2016.
WANG S H. The effects of dietary marigold extract on pigmentation, meat quality, antioxidant and immune capacity in broilers [D]. Master's Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [36] 钱旺, 王宝维, 张名爱, 等. 糖萜素和植物乳杆菌对肉鹅生长性能、屠宰性能、血清生化指标和肉品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2023, 35 (9): 5746–5754.
QIAN W, WANG B W, ZHANG M A, et al. Effects of sacchariter-penin and lactobacillus plantarum on growth performance, slaughter performance, serum biochemical indexes and meat quality of meat geese [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35 (9):

- 5746–5754. (in Chinese)
- [37] 张安青,杜仲水提取物对虹鳟生长和肌肉品质的影响研究[D].硕士学位论文.贵阳:贵州大学,2019.
- ZHANG A Q. Effects of *Eucommia ulmoides* olive aqueous extract on growth, muscle quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [D]. Master's Thesis. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese)
- [38] 郝红涛,赵改名,柳艳霞,等.肉类制品的质构特性及其研究进展[J].食品与机械,2009,25(3):125–128.
- HAO H T, ZHAO G M, LIU Y X, et al. The texture characteristics and advances of meat products [J]. Food & Machinery, 2009, 25(3): 125–128. (in Chinese)
- [39] 陈瑶君,曾少葵,陈振邦,等.杀菌条件对贝肉火腿肠质构和色泽的影响[J].轻工科技,2022,38(6):7–10.
- CHEN Y J, ZENG S K, CHEN Z B, et al. Effect of sterilization conditions on the texture and color of shell ham intestine [J]. Light Industry Science and Technology, 2022, 38(6): 7–10. (in Chinese)
- [40] JANNAT-ALIPOUR H, REZAEI M, SHABANPOUR B, et al. Addition of seaweed powder and sulphated polysaccharide on shelf life extension of functional fish surimi restructured product [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(8): 3777–3789.
- [41] 韦玲静,叶香尘,甘宝江,等.不同规格苏氏圆腹(鱼芒)生长性状和肌肉质构特性分析[J].水产养殖,2020,41(8):22–25.
- WEI L J, YE X C, GAN B J, et al. Analysis of the growth characteristics and muscle texture characteristics of different specifications of *Pangasius sutchi* [J]. Journal of Aquaculture, 2020, 41(8): 22–25. (in Chinese)
- [42] ALIJOŠIUS S, ŠASYTĖ V, MIEŽELIENĖ A, et al. Effect of triticale and non-starch polysaccharides (NSP) degrading enzymes on colour and sensory characteristics of broiler meat [J]. Veterinarija ir Zootechnika, 2018, 76(98): 3–8.
- [43] SZYM CZYK B, HAN CZAKOWSKI P, SZCZUREK W, et al. Effect of naked oat and enzymes in diets for broiler chickens on quality, fatty acid profile and oxidative stability of breast muscle [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2007, 57(4C): 541–545.
- [44] VARGAS-SÁNCHEZ R D, TORRESCANO-URRUTIA G R, IBARRA-ARIAS F J, et al. Effect of dietary supplementation with *Pleurotus ostreatus* on growth performance and meat quality of Japanese quail [J]. Livestock Science, 2018, 207: 117–125.
- [45] 吴琼,涂剑峰,益西次能,等.茶多酚对雉鸡生产性能、屠宰性能、肉品质、蛋品质、血清生化指标及抗氧化能力的影响[J].动物营养学报,2023,35(7):4520–4529.
- WU Q, TU J F, YI X C N, et al. Effects of tea polyphenols on performance, slaughter performance, egg quality, meat quality, serum biochemical indexes and antioxidant ability of pheasants [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(7): 4520–4529. (in Chinese)
- [46] CHEN X L, GUO Y F, JIA G, et al. Ferulic acid regulates muscle fiber type formation through the Sirt1/AMPK signaling pathway [J]. Food & Function, 2019, 10(1): 259–265.
- [47] RYU Y C, KIM B C. Comparison of histochemical characteristics in various pork groups categorized by postmortem metabolic rate and pork quality [J]. Journal of Animal Science, 2006, 84(4): 894–901.
- [48] 胡波,陈若楠,杨朝永,等.不同饲养方式对玫瑰冠鸡快慢肌发育及肉质性状的影响[J].中国畜牧杂志,2021,57(10):246–253.
- HU B, CHEN R N, YANG C Y, et al. Effects of different feeding methods on fast and slow muscle development and meat quality traits of rose-crowned chickens [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2021, 57(10): 246–253. (in Chinese)
- [49] 刘大鹏.肉鸭胸肌肌纤维形态与肉色的遗传分析[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2020.
- LIU D P. The genetic analysis of breast muscle fiber and meat color traits of duck [D]. Master's Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
- [50] DALLE ZOTTE A, RICCI R, CULLERE M, et al. Research note: effect of chicken genotype and white striping-wooden breast condition on breast meat proximate composition and amino acid profile [J]. Poultry Science, 2020, 99(3): 1797–1803.
- [51] LIU H, ZHA X Y, DING C C, et al. AST/ALT ratio and peripheral artery disease in a Chinese hypertensive population: a cross-sectional study [J]. Angiology, 2021, 72(10): 916–922.
- [52] JAIN P G, SURANA S J. Isolation, characterization and hypolipidemic activity of ferulic acid in high-fat-diet-induced hyperlipidemia in laboratory rats [J]. EX-

- CLI Journal, 2016, 15: 599–613.
- [53] NAOWABOOT J, PIYABHAN P, MUNKONG N, et al. Ferulic acid improves lipid and glucose homeostasis in high-fat diet-induced obese mice [J]. *Clinical and Experimental Pharmacology & Physiology*, 2016, 43 (2): 242–250.
- [54] KONG F L, ZHAO G P, HE Z X, et al. Serum creatine kinase as a biomarker to predict wooden breast *in vivo* for chicken breeding [J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 711711.
- [55] LIU X L, QI K, GONG Y, et al. Ferulic acid alleviates myocardial ischemia reperfusion injury via upregulating AMPK α 2 expression-mediated ferroptosis depression [J]. *Journal of Cardiovascular Pharmacology*, 2022, 79 (4): 489–500.
- [56] QIAO H Y, DAHIYA J P, CLASSEN H L. Nutritional and physiological effects of dietary sinapic acid (4-hydroxy-3,5-dimethoxy-cinnamic acid) in broiler chickens and its metabolism in the digestive tract [J]. *Poultry Science*, 2008, 87 (4): 719–726.

Effects of Ferulic Acid on Growth Performance, Slaughter Performance, Meat Quality, Muscle Texture Characteristics and Serum Biochemical Indices of White Feather Broilers

LI Xiang YIN Yue ZHANG Xiwen WANG Min WANG Yongfang ZHAO Yurong*

(College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of different dietary ferulic acid levels on growth performance, slaughter performance, meat quality, muscle texture characteristics and serum biochemical indices of white feather broilers. A total of 240 healthy Arbor Acres (AA) broilers of 1-day-old with similar body weight were randomly assigned into 4 groups with 6 replicates per group and 10 broilers per replicate. Broilers in the control group were fed a basal diet, and the others in experimental groups were fed the basal diet supplemented with 100, 300 and 600 mg/kg ferulic acid, respectively. The experiment lasted for 42 days. The results showed as follows: 1) compared with the control group, the feed to gain ratio from 1 to 21 days of age in 100 and 300 mg/kg ferulic acid supplemental groups was significantly decreased ($P < 0.05$). 2) Compared with the control group, the all eviscerated rate and breast muscle rate in all ferulic acid supplemental groups were significantly increased ($P < 0.05$), and the abdominal fat rate was significantly decreased ($P < 0.05$). 3) Compared with the control group, the yellowness (b^*) value of breast muscle in all ferulic acid supplemental groups was significantly decreased ($P < 0.05$); the pH at 45 min after slaughter ($\text{pH}_{45 \text{ min}}$) of breast muscle in 300 mg/kg ferulic acid supplemental group was significantly increased ($P < 0.05$); the pH at 24 h after slaughter ($\text{pH}_{24 \text{ h}}$) of breast muscle in 300 and 600 mg/kg ferulic acid supplemental groups was significantly increased ($P < 0.05$), and the water loss rate of breast muscle was significantly decreased ($P < 0.05$). 4) Compared with the control group, the redness (a^*) value and $\text{pH}_{45 \text{ min}}$ of leg muscle in all ferulic acid supplemental groups were significantly increased ($P < 0.05$), and the drip loss at 24 h was significantly decreased ($P < 0.05$); the shear force of leg muscle in 300 mg/kg ferulic acid supplemental group was significantly decreased ($P < 0.05$). 5) Compared with the control group, the adhesion, cohesiveness and chewiness of breast muscle in all ferulic acid supplemental groups were significantly increased ($P < 0.05$); the springiness of breast muscle in 100 mg/kg ferulic acid supplemental group was significantly increased ($P < 0.05$); the gumminess of breast muscle in 300 and 600 mg/kg ferulic acid supplemental groups was significantly increased ($P < 0.05$). 6) Compared with the control group, the hardness of leg muscle in 300 mg/kg ferulic acid supplemental group

* Corresponding author, professor, E-mail: 1335434506@qq.com

was significantly decreased ($P<0.05$); the adhesion of leg muscle in 100 and 300 mg/kg ferulic acid supplemental groups was significantly increased ($P<0.05$); the cohesiveness of leg muscle in 100 and 600 mg/kg ferulic acid supplemental groups was significantly increased ($P<0.05$). 7) Compared with the control group, the triglyceride (TG) content in serum in all ferulic acid supplemental groups was significantly decreased ($P<0.05$); the low density lipoprotein cholesterol (LDL-C) content and lactate dehydrogenase (LDH) activity in serum in 100 and 600 mg/kg ferulic acid supplemental groups were significantly decreased ($P<0.05$); the high density lipoprotein cholesterol (HDL-C) content in serum in 300 and 600 mg/kg ferulic acid supplemental groups was significantly increased ($P<0.05$), and the creatine kinase (CK) activity in serum was significantly decreased ($P<0.05$). In conclusion, dietary supplementation with appropriate level of ferulic acid can reduce the ratio of feed to gain in early growth stage of AA broilers, increase the all eviscerated rate and breast muscle rate, decrease the abdominal fat rate and serum TG content, and have certain effects on meat quality and muscle texture characteristics. Under the conditions of this experiment, the optimal supplemental level of ferulic acid in diets for white feather broilers is 300 mg/kg. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36 (2):921-934]

Key words: ferulic acid; white feather broilers; growth performance; slaughter performance; meat quality; muscle texture characteristics; serum biochemical indices