



马龙飞,陈顺,周斌斌,等. 饲料添加不同水平芦丁对肉鸡肉品质和抗氧化功能的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(1):78-86.  
MA Longfei, CHEN Shun, ZHOU Binbin, et al. Effects of different levels of dietary rutin supplementation on meat quality and muscle antioxidant capacity of broilers[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(1): 78-86.

## 饲料添加不同水平芦丁对肉鸡肉品质和抗氧化功能的影响

马龙飞,陈顺,周斌斌,刘慧娟,张佳琦,王恬,王超\*

(南京农业大学动物科技学院,江苏 南京 210095)

**摘要:**[目的]本试验旨在研究饲料添加不同水平芦丁对肉鸡肌肉品质和抗氧化功能的影响。[方法]试验选取1日龄健康且体重相近的雄性肉鸡256只,随机分为4组,每组8个重复,每个重复8只鸡。对照组饲喂基础饲料,试验组在基础饲料中分别添加250、500和1000 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁。试验期第42天,每个重复取1只接近平均体重的肉鸡屠宰取样测定肉鸡肉品质、水分分布、脂肪酸含量、抗氧化等相关指标。[结果]与对照组相比,饲料中添加250、500和1000 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁显著降低了胸肌宰后24和48 h的滴水损失( $P_T < 0.05$ ),添加250与500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁分别降低胸肌的蒸煮损失与剪切力值( $P_T < 0.05$ ),添加500和1000 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁显著提高了胸肌pH<sub>24h</sub>值( $P_T < 0.05$ ),添加500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁显著降低了肉鸡胸肌中自由水的弛豫时间( $T_{22}$ )值( $P_T < 0.05$ );饲料中芦丁的添加量与pH<sub>24h</sub>值、24和48 h的滴水损失呈线性或二次相关( $P_T < 0.05$ )。在脂肪酸含量方面,饲料中添加250和500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁显著增加了肉鸡胸肌中硬脂酸含量( $P_T < 0.05$ ),添加500和1000 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁显著提高了肉鸡胸肌中花生一烯酸和多不饱和脂肪酸(PUFA)含量( $P_T < 0.05$ ),同时500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁组胸肌中棕榈油酸和二十四碳一烯酸含量显著增加( $P_T < 0.05$ ),1000 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁组胸肌中 $\gamma$ -亚油酸含量显著降低( $P_T < 0.05$ )。在抗氧化能力方面,饲料中添加500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁显著降低了胸肌中MDA含量( $P_T < 0.05$ ),提高了T-SOD活性( $P_T < 0.05$ ),并显著增加胸肌中Nrf2和SOD mRNA的表达量( $P_T < 0.05$ ),250 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁能够显著提高SOD mRNA的表达量( $P_T < 0.05$ )。饲料中芦丁的添加量与MDA含量、Nrf2和GSH-Px mRNA表达量呈线性或二次相关( $P < 0.05$ )。[结论]肉鸡饲料中添加芦丁可通过增强肌肉的保水性,提高胸肌pH<sub>24h</sub>值并调节肉鸡胸肌中脂肪酸比例从而提高了肉鸡肉品质,这与芦丁激活肌肉中Nrf2信号通路并增强其抗氧化能力有关。在本试验条件下,芦丁的适宜添加量为500 mg·kg<sup>-1</sup>。

**关键词:**芦丁;肉鸡;肌肉品质;脂肪酸;抗氧化

中图分类号:S852.6

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)01-0078-09

## Effects of different levels of dietary rutin supplementation on meat quality and muscle antioxidant capacity of broilers

MA Longfei, CHEN Shun, ZHOU Binbin, LIU Huijuan, ZHANG Jiaqi, WANG Tian, WANG Chao\*

(College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:**[Objectives] This experiment was conducted to investigate the effects of different dietary levels of rutin on meat quality and muscle antioxidant capacity of broilers. [Methods] A total of 256 1-day-old healthy male broilers with similar body weight were randomly divided into 4 groups with 8 replicates per group and 8 broilers per replicate. The control group was fed basal diet, and the experimental groups were fed with the basal diet supplemented with 250, 500 and 1000 mg·kg<sup>-1</sup> rutin, respectively. On the 42nd day of this experimental period, 1 broiler (close to the average body weight) was selected from each replicate for slaughtering and sampling to determine the related indexes of muscle quality, moisture distribution, fatty acid content, antioxidant capacity in muscle. [Results] Compared with the control group, the supplementation of 250, 500 and 1000 mg·kg<sup>-1</sup> rutin significantly reduced the drip loss of the pectoralis major (PM) muscle at postmortem 24 and 48 h ( $P_T < 0.05$ ), and the supplementation of 250 and 500 mg·kg<sup>-1</sup> rutin decreased the cooking loss and shear force values of the PM muscle, respectively ( $P_T < 0.05$ ). The supplementation of 500 and 1000 mg·kg<sup>-1</sup> rutin significantly increased the pH<sub>24h</sub> value of PM muscle ( $P_T < 0.05$ ); the supplementation of 500 mg·kg<sup>-1</sup> rutin significantly decreased the relaxation time  $T_{22}$  of free water in breast muscle of broilers ( $P_T < 0.05$ ), and the pH<sub>24h</sub> and drip loss at 24 and 48 h were linearly or quadratic correlated with the supplemental level of rutin ( $P_T < 0.05$ ). In terms of fatty acid content, dietary 250 and 500 mg·kg<sup>-1</sup> rutin significantly increased the content of stearic acid in PM muscle of broilers ( $P_T < 0.05$ ), and dietary 500 and 1000 mg·kg<sup>-1</sup> rutin

收稿日期:2022-11-18

基金项目:江苏省苏北科技计划项目(SZ-YC202146);国家自然科学基金项目(31972598)

\*通信作者:王超,副教授,研究方向为动物营养与饲料科学,E-mail:wangchao121@njau.edu.cn。

significantly increased the contents of arachidonic acid and polyunsaturated fatty acid (PUFA) in PM muscle of broilers ( $P_T < 0.05$ ). At the same time, the contents of palmitoleic acid and tetracenoic acid in PM muscle of  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  rutin group significantly increased ( $P_T < 0.05$ ), and the content of  $\gamma$ -linoleic acid of  $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  rutin group significantly decreased ( $P_T < 0.05$ ). In terms of antioxidant capacity, dietary  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  rutin significantly decreased MDA content in PM muscle ( $P_T < 0.05$ ), increased T-SOD activity ( $P_T < 0.05$ ), and significantly increased *Nrf2* and *SOD* mRNA expressions levels in PM muscle ( $P_T < 0.05$ ).  $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  rutin significantly increased *SOD* mRNA expression level ( $P_T < 0.05$ ), and there was a linear or quadratic correlation between rutin supplemental level and MDA content, *Nrf2* and *GSH-Px* mRNA expression level ( $P < 0.05$ ). [Conclusions] Dietary rutin improves meat quality of broilers by enhancing the water retention of muscle, increasing the  $\text{pH}_{24\text{h}}$  value of breast muscle and improving the proportion of fatty acids in breast muscle, which may be related to the activation of *Nrf2* signaling pathway and the enhancement of antioxidant capacity. Under the conditions of this experiment, the appropriate supplementation of rutin is  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

**Keywords:** rutin; broiler; muscle quality; fatty acid; antioxidant

肉鸡产品具有较高的营养价值及相对低廉的价格, 现已成为居民肉类食品中不可缺少的部分。随着生活水平的日益提高, 消费者对肉鸡的肉品质也有了更高要求。研究发现, 过量的氧自由基可与鸡肉中大量蛋白质、脂质特别是不饱和脂肪酸(UFA)发生氧化反应, 降低鸡肉风味, 严重影响肉品质<sup>[1]</sup>。此外, 肉的保水性、色泽和嫩度也会影响肉品质, 影响消费者的购买欲望。营养调控是一种有效改善鸡肉品质的方式。近年来, 在饲料添加具有绿色、多功能等特点的植物提取物以提高机体抗氧化功能、改善鸡肉品质的营养调控方式受到广泛关注<sup>[2]</sup>。

芦丁(rutin)又名芸香苷, 是一种多酚类化合物, 化学式为  $\text{C}_{27}\text{H}_{30}\text{O}_{16}$ , 可从白纹豆属、菖蒲属、桉树属等植物中获得<sup>[3-4]</sup>。芦丁对超氧化物、过氧化物及自由基等表现出较高的抗氧化性质, 具有广泛应用于医药、饲料等行业的潜力<sup>[5]</sup>, 同样芦丁还具有抗菌<sup>[6]</sup>、抗炎<sup>[7]</sup>、预防肥胖<sup>[8]</sup>和维护肠道功能<sup>[9]</sup>等作用。研究发现, 芦丁可减少高脂饮食诱导小鼠肌肉中脂肪含量<sup>[10]</sup>; 还可显著改善银鲈鱼肌肉中的脂肪酸分布, 进而防止肌肉损伤<sup>[11]</sup>; 还有研究发现饲料添加 0.15% 芦丁可缓解嗜水藻诱导的银鲈鱼氧化应激, 提高抗氧化能力<sup>[12]</sup>。芦丁在畜禽生产中也有广泛应用, Hassan 等<sup>[13]</sup>研究发现, 在肉仔鸡饲料中添加  $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  芦丁可显著增强肉仔鸡肝脏抗氧化能力, 提高生长性能; 芦丁可增强奶牛抗应激能力, 提高其生产性能<sup>[14]</sup>; 王海波等<sup>[15]</sup>也发现芦丁可提高湖羊机体抗氧化能力。目前, 关于芦丁的研究主要集中在小鼠、鱼类及反刍动物上, 饲料中添加芦丁对肉鸡肉品质的影响研究尚未见报道。因此, 本试验通过在饲料中添加不同水平的芦丁, 从肉鸡肌肉品质、脂肪酸含量、抗氧化能力等系统评估芦丁对肉鸡肉品质的影响, 为芦丁在肉鸡上的应用及研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

选择 256 只 1 日龄 AA 肉鸡 [ $43 \pm 0.5$ ] g 为试验对象, 将其随机分为 4 组, 每组 8 个重复, 每个重复 8 只鸡, 分别饲喂基础饲料添加  $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (对照组), 以及 250、500 和  $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  芦丁 (处理组)。试验期 42 d, 分为饲养前期 (1~21 d) 和饲养后期 (22~42 d)。基础饲料按照美国国家研究委员会颁布的家禽营养需求标准 (NRC, 1994) 配制, 相应成分和营养水平见表 1。试验所用芦丁 (纯度 > 95%) 购自上海阿拉丁生物技术股份有限公司。

### 1.2 饲养管理

禽舍消毒 1 周后采用 3 层叠笼饲养, 每笼 8 只肉鸡, 各组间各重复的肉鸡在同层高的笼子里进行饲养, 避免层高对其产生的影响。试验期间, 肉鸡自由采食粉料和饮水, 前 3 d 房间温度保持恒温 ( $34 \pm 1$ ) °C, 每周稳定下降 2~3 °C, 最终温度为 22 °C, 相对湿度 45%~55%, 按常规程序进行免疫。

### 1.3 样品采集与处理

在试验第 42 天时, 试验鸡禁食 12 h 后, 每重复选取接近该重复平均体重的 1 只鸡屠宰, 解剖取左侧胸肌样品, 用于抗氧化酶活和相关基因表达的分析, 右侧胸肌样品用于肉品质、低场核磁共振技术 (NMR)、脂肪酸等相关指标测定。

### 1.4 指标测定与方法

**1.4.1 胸肌肉品质** 取右侧胸肌使用色度计 (Konica Minolta Sensing Inc, 日本) 测定肌肉肉色 (亮度、红

度、黄度),使用便携式 pH 计(HI9125,HANNA Instruments,意大利)测定肌肉 pH 值( $\text{pH}_{45 \text{ min}}$ 、 $\text{pH}_{24 \text{ h}}$ ),使用数字嫩度仪(C-LM3B,东北农业大学)测定肌肉剪切力,使用电子天平等仪器测定肌肉蒸煮损失和滴水损失(24 和 48 h)等指标,具体操作步骤参照王雨雨等<sup>[16]</sup>的方法。

表 1 基础饲料原料组成及营养组成

Table 1 Ingredient compositions and nutrient compositions of basal diets

组成 Composition	1~21 日龄	22~42 日龄	组成 Composition	1~21 日龄	22~42 日龄
	1-21 days old	22-42 days old		1-21 days old	22-42 days old
原料组成 Ingredients			营养组成 Nutrient <sup>2</sup>		
玉米 Corn	57.02	61.36	代谢能 Metabolic energy <sup>3</sup>	12.57	12.91
豆粕 Soybean meal	31.30	28.30	粗蛋白 Crude protein	21.42	19.23
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	3.70	1.70	赖氨酸 Lys	1.20	1.10
豆油 Soy oil	3.00	4.00	蛋氨酸 Met	0.50	0.44
磷酸氢钙 Dicalcium phosphate	2.00	1.60	赖氨酸 Lys	1.00	0.93
石粉 Limestone	1.20	1.40	钙 Calcium	0.46	0.30
L-赖氨酸盐酸盐 L-lysine hydrochloride	0.33	0.31	有效磷 Available phosphorus		
DL-蛋氨酸 DL-methionine	0.15	0.13			
氯化钠 Sodium chloride	0.30	0.30			
预混料 Premix <sup>1</sup>	1.00	1.00			

注:1)预混料为每千克饲料提供:维生素 A,10 000 IU;维生素 D<sub>3</sub>,3 000 IU;维生素 E,30 IU;维生素 K<sub>3</sub>,1.3 mg;硫胺素,2.2 mg;核黄素,8 mg;烟酸,40 mg;氯化胆碱,600 mg;泛酸钙,10 mg;吡哆醇,4 mg;生物素,0.04 mg;叶酸,1 mg;维生素 B<sub>12</sub>,0.013 mg;铁,80 mg;铜,8 mg;锰,110 mg;锌,65 mg;碘,1.1 mg;硒,0.3 mg。2)营养水平为计算值。3)代谢能单位是 MJ·kg<sup>-1</sup>。

Notes:1)Premix provided per kg diet: vitamin A,10 000 IU; vitamin D<sub>3</sub>,3 000 IU; vitamin E,30 IU; vitamin K<sub>3</sub>,1.3 mg; thiamine,2.2 mg; riboflavin,8 mg; niacin,40 mg; choline chloride,600 mg; calcium pantothenate,10 mg; pyridoxine,4 mg; biotin,0.04 mg; folic acid,1 mg; vitamin B<sub>12</sub>,0.013 mg; iron,80 mg; copper,8 mg; manganese,110 mg; zinc,65 mg; iodine,1.1 mg; selenium,0.3 mg。2) Nutrient levels were calculated values.3) The unit of metabolizable energy is MJ·kg<sup>-1</sup>。

**1.4.2 胸肌水分状态及分布情况** 称取胸肌样品(约 2 g)使用 PQ001 LF-NMR 分析仪(上海纽迈电子科技有限公司)测定肉鸡胸肌中结合水、不易流动水、自由水的弛豫时间( $T_{2b}$ 、 $T_{21}$ 、 $T_{22}$ )并计算得出相应峰面积比( $P_{2b}$ 、 $P_{21}$ 、 $P_{22}$ )。具体操作步骤参照黄子信等<sup>[17]</sup>的方法。

**1.4.3 脂肪酸组成分析** 脂肪酸组成测定采用气相色谱法,称取 2 g 左右胸肌样品到试管中,用氯仿-甲醇法提取肌肉中的脂质,加 2 mL 十五碳酸( $5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ )、2 mL 氯仿-甲醇(2:1)、1 mL  $8.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸,混匀。在水解(70~80 °C,40 min)期间,每 10 min 振荡试管 1 次。水解完成后取出试管冷却至室温。然后用氢氧化钠/甲醇对脂肪酸甲酯进行气相色谱预处理后上气相色谱仪(Agilent Technologies Co, Ltd, Palo Alto, CA)检测,具体步骤参照 Yu 等<sup>[18]</sup>的方法。

**1.4.4 胸肌组织抗氧化酶活性测定** 取胸肌组织样品(约 100 mg)与生理盐水按质量体积比为 1:9 的比例匀浆,在 4 °C、 $3 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 15 min,吸取上清液用于测定胸肌组织中总蛋白(total protein, TP)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量和总抗氧化能力(total anti-oxidant capacity, T-AOC)、总超氧化物歧化酶(total-superoxide dismutase, T-SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)和过氧化氢酶(catalase, CAT)的活性。试剂盒均购自南京建成生物研究所,测定步骤按照试剂盒说明书进行。

**1.4.5 胸肌组织 mRNA 相对表达量测定** 取胸肌组织样品(约 0.1 g),使用 TRIzol 试剂(TaKaRa)提取总 RNA,通过 RT-qPCR 检测目的基因 mRNA 表达量。具体操作根据刘慧娟等<sup>[19]</sup>的研究方法。以  $\beta$ -actin 为内参基因,使用  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  方法计算各基因 mRNA 的相对表达量<sup>[20]</sup>。引物序列见表 2。

表 2 本试验中 PCR 引物序列

Table 2 PCR primers sequences in this experiment

基因 Gene	登录号 Accession number	引物序列 Primers sequence(5'→3')	产物大小/bp Products length
<i>Nrf2</i>	NM_205117.1	CGCTTTCTTCAGGGGTAGCA/AGTTCGGTGCAGAAGAGGTG	170
<i>NQO1</i>	NM_001277621.1	GGCAATGGCAGCAGCAG/AAGCACTCGGGTCTCTGAG	138
<i>SOD</i>	NM_205064.1	CCGGCTTGTCTGATGGAGAT/TGCATCTTTTGGTCCACCGT	124
<i>GSH-Px</i>	NM_001277853.1	GACCAACCCGCAGTACATCA/GAGGTGCGGGCTTTCCTTTA	205
<i>HO-1</i>	NM_205344.1	TGTCCCTCCACGAGTCAAG/CTCCAGTTGCTGCCATAGAA	181
$\beta$ -actin	NM_205518.1	TGCTGTGTTCCCATCTATCG/TTGTTGACAATACCGTGTCA	150

注:*Nrf2*:核因子 E2 相关因子 2 基因 Nuclear factor erythroid-2 related factor 2 gene;*NQO1*:NAD(P)H 醌氧化还原酶 1 基因 NADPH quinone oxidoreductase 1 gene;*SOD*:超氧化物歧化酶基因 Superoxide dismutase gene;*GSH-Px*:谷胱甘肽过氧化物酶基因 Glutathione peroxidase gene;*HO-1*:血红素加氧酶 1 基因 Heme oxygenase 1 gene; $\beta$ -actin: $\beta$ -肌动蛋白基因  $\beta$ -actin gene. 下同 The same as follows.

## 1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 22.0 统计软件对试验数据进行单因素方差分析,并用 Duncan's 法进行多重比较,采用多项式中的线性和二次分析对芦丁不同梯度的效果进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水平芦丁对肉鸡肌肉品质的影响

如表 3 所示:与对照组相比,饲料中添加 250、500 和 1 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁显著降低了胸肌宰后 24 和 48 h 的滴水损失 ( $P_T < 0.05$ ),且肉鸡胸肌宰后 24 和 48 h 的滴水损失与芦丁添加量有显著剂量效应 ( $P_L < 0.05$ ;  $P_Q < 0.05$ );添加 250 与 500  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁分别降低了胸肌的蒸煮损失与剪切力值 ( $P_T < 0.05$ ),且胸肌蒸煮损失和剪切力值与芦丁添加量呈二次曲线相关 ( $P_Q < 0.05$ );添加 500 和 1 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁显著提高了胸肌  $\text{pH}_{24\text{h}}$  值 ( $P_T < 0.05$ ),且随着芦丁添加量的增加,胸肌  $\text{pH}_{24\text{h}}$  值呈线性增加 ( $P_L < 0.05$ )。但饲料添加 250、500 和 1 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁对胸肌肉色和  $\text{pH}_{45\text{min}}$  值未产生显著影响 ( $P_T > 0.05$ )。

表 3 不同水平芦丁对肉鸡胸肌肌肉品质的影响

Table 3 Effects of different levels of rutin on breast muscle quality of broilers

项目 Items	芦丁添加水平/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Rutin supplemental levels				标准误 SE	P 值 P-value		
	0	250	500	1 000		$P_T$	$P_L$	$P_Q$
$a^*$ 红度 (Redness)	3.65	3.83	3.86	3.62	0.06	0.455	0.905	0.116
$b^*$ 黄度 (Yellowness)	23.20	23.31	23.73	22.75	0.17	0.245	0.537	0.112
$L^*$ 亮度 (Lightness)	48.60	48.74	49.03	48.42	0.16	0.62	0.875	0.267
$\text{pH}_{45\text{min}}$	6.42	6.42	6.48	6.42	0.02	0.646	0.738	0.482
$\text{pH}_{24\text{h}}$	5.81 <sup>b</sup>	5.90 <sup>ab</sup>	5.92 <sup>a</sup>	5.97 <sup>a</sup>	0.02	0.015	0.002	0.598
剪切力/N Shear force	21.34 <sup>a</sup>	21.26 <sup>a</sup>	19.52 <sup>b</sup>	22.24 <sup>a</sup>	0.32	0.015	0.705	0.019
蒸煮损失/% Cooking loss	14.09 <sup>a</sup>	11.29 <sup>b</sup>	12.20 <sup>ab</sup>	13.36 <sup>a</sup>	0.36	0.025	0.663	0.005
24 h 滴水损失/% Drip loss at 24 h	2.23 <sup>a</sup>	1.51 <sup>b</sup>	1.27 <sup>b</sup>	1.46 <sup>b</sup>	0.09	<0.001	<0.001	0.003
48 h 滴水损失/% Drip loss at 48 h	2.86 <sup>a</sup>	2.01 <sup>b</sup>	1.79 <sup>bc</sup>	1.55 <sup>c</sup>	0.11	<0.001	<0.001	0.025

注:1)  $\text{pH}_{45\text{min}}$  和  $\text{pH}_{24\text{h}}$  分别代表屠宰后 45 min 和 24 h 的 pH 值。 $\text{pH}_{45\text{min}}$  和  $\text{pH}_{24\text{h}}$  represent the pH values at postmortem 45 minutes and 24 hours, respectively. 2) 同行数据不同上标小写字母表示组间差异显著 ( $P_T < 0.05$ )。The different superscript small letters in the same row means significant difference among the treatments ( $P_T < 0.05$ ). 3)  $P_T$ 、 $P_L$  和  $P_Q$  分别代表处理、线性和二次曲线 P 值。 $P_T$ 、 $P_L$  和  $P_Q$  stand for P-value of treatment, linear and quadratic linear, respectively. 下同。The same below.

### 2.2 不同水平芦丁对肉鸡胸肌水分分布状态的影响

如表 4 可知:与对照组相比,饲料中添加 500  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁显著降低了肉鸡胸肌中自由水的弛豫时间  $T_{22}$  值 ( $P_T < 0.05$ );饲料添加 250、500 和 1 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁对肉鸡胸肌中结合水、不易流动水和自由水的峰面积比 ( $P_{2b}$ 、 $P_{21}$  和  $P_{22}$ ) 未产生显著影响 ( $P_T > 0.05$ )。

表 4 不同水平芦丁对肉鸡胸肌水分分布状态的影响

Table 4 Effects of different levels of rutin on breast muscle water distribution of broilers

项目 Item	芦丁添加水平/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Rutin supplemental levels				标准误 SE	P 值 P-value		
	0	250	500	1 000		$P_T$	$P_L$	$P_Q$
$T_{2b}/\text{ms}$	1.22	1.36	1.40	1.38	0.04	0.374	0.142	0.343
$T_{21}/\text{ms}$	103.23	99.67	119.89	109.20	6.83	0.757	0.550	0.802
$T_{22}/\text{ms}$	521.77 <sup>a</sup>	533.32 <sup>a</sup>	454.38 <sup>b</sup>	513.44 <sup>a</sup>	10.85	0.039	0.249	0.238
$P_{2b}/\%$	2.87	2.72	2.42	2.67	0.12	0.619	0.424	0.408
$P_{21}/\%$	96.01	96.22	96.61	96.29	0.13	0.436	0.298	0.308
$P_{22}/\%$	1.12	1.06	0.97	1.04	0.04	0.630	0.355	0.435

注:1)  $T_{2b}$ 、 $T_{21}$  和  $T_{22}$  分别代表结合水、不易流动水和自由水的弛豫时间。 $T_{2b}$ 、 $T_{21}$  和  $T_{22}$  represent the peak time of bound water, unflowable water and free water, respectively. 2)  $P_{2b}$ 、 $P_{21}$  和  $P_{22}$  分别代表结合水、不易流动水和自由水的峰面积比。 $P_{2b}$ 、 $P_{21}$  和  $P_{22}$  represent the peak area ratio of bound water, unflowable water and free water, respectively.

### 2.3 不同水平芦丁对肉鸡肌肉脂肪酸含量的影响

如表 5 所示:与对照组相比,饲料中添加 250 和 500  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁显著增加了肉鸡胸肌中硬脂酸含量 ( $P_T < 0.05$ ),500  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁组胸肌中棕榈油酸和二十四碳一烯酸含量显著增加 ( $P_T < 0.05$ ),且胸肌中硬脂酸、棕榈油酸和二十四碳一烯酸含量与芦丁添加量呈二次曲线相关 ( $P_Q < 0.05$ );饲料中添加 500 和 1 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  芦丁显著提高了肉鸡胸肌中花生一烯酸和多不饱和脂肪酸 (PUFA) 含量 ( $P < 0.05$ ),1 000

mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁组胸肌中  $\gamma$ -亚油酸含量显著降低 ( $P_T < 0.05$ ); 并随着芦丁添加量的增加, 胸肌中花生一烯酸、花生四烯酸、多不饱和脂肪酸和  $\gamma$ -亚油酸含量值呈线性增加 ( $P_L < 0.05$ ), 但饲料添加 250、500 和 1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁对肉鸡胸肌中其他脂肪酸含量未产生显著影响 ( $P_T > 0.05$ )。

表 5 不同水平芦丁对肉鸡胸肌中脂肪酸含量的影响

脂肪酸 Fatty acids	芦丁添加水平/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Rutin supplemental levels				标准误 SE	P 值 P-value		
	0	250	500	1 000		$P_T$	$P_L$	$P_Q$
饱和脂肪酸 SFA								
银杏酸 C15:0	8.69	7.40	6.80	7.94	0.33	0.208	0.320	0.065
棕榈酸 C16:0	20.62	21.07	23.27	20.62	0.61	0.367	0.690	0.211
十七碳酸 C17:0	2.72	2.18	1.98	2.10	0.12	0.145	0.061	0.166
硬脂酸 C18:0	1.59 <sup>c</sup>	4.19 <sup>a</sup>	2.74 <sup>b</sup>	2.31 <sup>bc</sup>	0.24	<0.001	0.662	<0.001
花生酸 C20:0	2.56	3.22	3.26	2.63	0.19	0.407	0.880	0.095
总计 Total	36.18	38.07	38.04	35.61	0.97	0.750	0.845	0.288
单不饱和脂肪酸 MUFA								
十五碳一烯酸 C15:1n5	16.17	17.37	16.62	16.68	0.43	0.816	0.846	0.523
棕榈油酸 C16:1n9c	0.32 <sup>b</sup>	0.30 <sup>b</sup>	0.93 <sup>a</sup>	0.34 <sup>b</sup>	0.09	0.023	0.347	0.078
反式油酸 C18:1n9t	4.89	3.26	5.03	4.05	0.27	0.073	0.751	0.526
油酸 C18:1n9c	3.29	3.74	3.78	3.09	0.14	0.222	0.645	0.046
花生一烯酸 C20:1	0.33 <sup>c</sup>	0.46 <sup>bc</sup>	0.77 <sup>ab</sup>	0.85 <sup>a</sup>	0.07	0.017	0.002	0.881
二十二碳一烯酸 C22:1n9	2.68	2.58	4.14	4.17	0.84	0.857	0.447	0.971
二十四碳一烯酸 C24:1n9	2.59 <sup>b</sup>	2.85 <sup>b</sup>	3.66 <sup>a</sup>	2.45 <sup>b</sup>	0.11	<0.001	0.575	<0.001
总计 Total	30.26	30.56	34.93	31.62	0.87	0.211	0.273	0.295
多不饱和脂肪酸 PUFA								
$\gamma$ -亚油酸 C18:2n6t	0.93 <sup>a</sup>	0.93 <sup>a</sup>	0.81 <sup>ab</sup>	0.72 <sup>b</sup>	0.03	0.013	0.002	0.356
$\alpha$ -亚油酸 C18:2n6c	1.09	0.66	1.00	0.89	0.07	0.178	0.642	0.263
$\gamma$ -亚麻酸 C18:3n-6	0.82	0.97	1.16	1.15	0.07	0.222	0.051	0.546
$\alpha$ -亚麻酸 C18:3n-3	0.83	1.07	0.97	1.04	0.04	0.066	0.080	0.180
花生四烯酸 C20:4n-6	0.74	1.67	1.68	2.60	0.26	0.081	0.015	0.985
花生三烯酸 C20:3n-3	1.01	0.91	1.36	0.52	0.12	0.073	0.296	0.098
总计 Total	5.42 <sup>b</sup>	6.22 <sup>ab</sup>	6.98 <sup>a</sup>	6.91 <sup>a</sup>	0.22	0.030	0.006	0.281

注: SFA: 饱和脂肪酸 Saturated fatty acid; MUFA: 单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acid; PUFA: 多不饱和脂肪酸 Polyunsaturated fatty acids.

## 2.4 不同水平芦丁对肉鸡肌肉抗氧化能力的影响

如表 6 所示: 与对照组相比, 饲料中添加 500 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著降低了胸肌中 MDA 含量 ( $P_T < 0.05$ ), 提高了 T-SOD 活性 ( $P_T < 0.05$ ), 胸肌中 T-SOD 活性和 T-AOC 与芦丁添加量呈线性增加 ( $P_L < 0.05$ ), 胸肌中 MDA 含量与芦丁添加量呈二次曲线相关 ( $P_Q < 0.05$ ), 但饲料添加 250、500 和 1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁对肉鸡胸肌中 GSH-Px 和 CAT 活性无显著影响 ( $P_T > 0.05$ )。

表 6 不同水平芦丁对肉鸡肌肉抗氧化能力的影响

项目 Items	芦丁添加水平/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Rutin supplemental levels				标准误 SE	P 值 P-value		
	0	250	500	1 000		$P_T$	$P_L$	$P_Q$
丙二醛含量/(nmol·mg <sup>-1</sup> ) MDA content	0.47 <sup>a</sup>	0.39 <sup>ab</sup>	0.37 <sup>b</sup>	0.44 <sup>ab</sup>	0.01	0.040	0.381	0.007
总超氧化物歧化酶活性/(U·mg <sup>-1</sup> ) T-SOD activity	33.27 <sup>b</sup>	34.85 <sup>ab</sup>	38.52 <sup>a</sup>	36.28 <sup>b</sup>	0.62	0.013	0.014	0.088
过氧化氢酶活性/(U·mg <sup>-1</sup> ) CAT activity	12.88	11.72	13.72	11.47	0.49	0.347	0.616	0.582
谷胱甘肽过氧化物酶活性/(U·mg <sup>-1</sup> ) GSH-Px activity	21.41	22.05	25.16	23.19	0.78	0.350	0.230	0.404
总抗氧化能力/(U·mg <sup>-1</sup> ) T-AOC	4.81	5.00	5.11	5.19	0.06	0.125	0.021	0.609

Note: MDA: Malondialdehyde; T-SOD: Total-superoxide dismutase; CAT: Catalase; GSH-Px: Glutathione peroxidase; T-AOC: Total anti-oxidant capacity.

## 2.5 不同水平芦丁对肉鸡肌肉抗氧化相关基因表达量的影响

如图 1 所示: 与对照组相比, 饲料中添加 250 和 500 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著提高了胸肌中 SOD mRNA 的表达量 ( $P_T < 0.05$ ), 且 SOD mRNA 的表达量 ( $P_Q < 0.05$ ) 与芦丁添加量呈二次曲线相关 ( $P_Q < 0.05$ ); 饲料中添加 500 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著提高了胸肌中 Nrf2 mRNA 的表达量 ( $P_T < 0.05$ ), 并随着芦丁添加量的增加, 胸肌中 Nrf2 和 GSH-Px mRNA 的表达量呈线性增加 ( $P_L < 0.05$ )。但饲料添加 250、500 和 1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁对

*HO-1* 和 *NQO1* mRNA 的表达量无显著影响 ( $P_T > 0.05$ )。

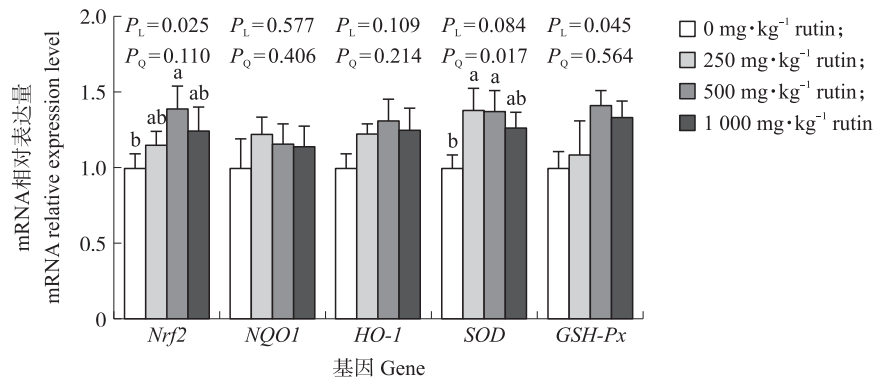


图 1 不同水平芦丁对肉鸡肌肉抗氧化相关基因 mRNA 表达量的影响

Fig. 1 Effects of different levels of rutin on mRNA expression of antioxidant-related genes in broiler muscles

### 3 讨论

#### 3.1 不同水平芦丁对肉鸡肌肉品质和水分布的影响

肉色、pH、滴水损失、蒸煮损失、系水力及嫩度等是反映肉品质的主要指标<sup>[21]</sup>。肌肉 pH 值反映了其酸碱度,其可直接影响肌肉的肉色和剪切力等,动物屠宰后糖酵解反应产生乳酸,其可降低肌肉 pH 值,导致肌肉风味变差,保水性下降,进而影响肌肉品质<sup>[22]</sup>。本试验中,添加 500 和 1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著提高了肉鸡胸肌 pH<sub>24h</sub> 值,此结果表明芦丁能够提高肉鸡胸肌 pH 值并改善肌肉品质。肌肉肉色可反映肌肉的生理和生化等水平,是评价肉品质的重要指标之一<sup>[23]</sup>。郑旭<sup>[24]</sup> 研究表明,饲料添加 10 和 50 mg·kg<sup>-1</sup> 槲皮万寿菊素可显著降低肉鸡胸肌黄度值。在本试验中,饲料中添加芦丁对肉鸡肌肉肉色的相关指标并无显著影响,这可能与芦丁的纯度和添加剂量不同有关。肌肉滴水损失和蒸煮损失的提高对肉的外观、保水性、食用质量等造成不良影响<sup>[25]</sup>。肌肉剪切力值可用来评价肌肉的嫩度,剪切力值低则肉质嫩度高,肉质适口性好<sup>[26]</sup>。在本试验中,饲料中添加芦丁能够显著降低胸肌屠宰后 24 和 48 h 的滴水损失,这与 Ouyang 等<sup>[27]</sup> 研究发现苜蓿黄酮可降低肉鸡胸肌滴水损失的试验结果相似。添加 250 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著降低了胸肌蒸煮损失,而添加 500 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著降低了胸肌剪切力,姜义宝等<sup>[28]</sup> 研究表明,饲料添加红车轴草异黄酮能够降低肉鸡肌肉中滴水损失和剪切力值,本试验结果与之类似。综上,芦丁可通过提高肉鸡胸肌 pH<sub>24h</sub> 值,降低滴水损失、蒸煮损失和剪切力值,增强鸡肉保水性和嫩度。

肌肉组织中的水分主要包括结合水、不易流动水和自由水。结合水与细胞内部的蛋白质紧密结合,不影响肌肉保水性;不易流动水存在于细胞内部,其含量增加表明肌肉保水性提高;自由水存在于肌肉细胞间隙,为容易流失的不稳定水<sup>[29]</sup>。弛豫时间 ( $T_{22}$ ) 值可反映不易流动水的自由程度,其值越高,不易流动水越容易转变为自由水,导致水分流失增加,保水性能下降<sup>[30]</sup>。吴焯等<sup>[31]</sup> 研究结果表明,不易流动水和自由水的弛豫时间 ( $T_{21}$ ) 和 ( $T_{22}$ ) 随着肌肉 pH 值升高而降低,而本试验结果表明,饲料中添加 500 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁能够显著降低胸肌中自由水弛豫时间 ( $T_{22}$ ) 值,这与芦丁可提高胸肌 pH<sub>24h</sub> 值结果相符。综合胸肌滴水损失来看,饲料添加芦丁可以提高肉鸡肌肉的保水性。

#### 3.2 不同水平芦丁对肉鸡肌肉脂肪酸含量的影响

肌肉不同脂肪酸含量对肉的嫩度、风味和营养价值等均会产生影响,是评价肉品质的重要指标<sup>[32]</sup>。本试验结果表明饲料中添加 500 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著增加了肉鸡胸肌中硬脂酸、棕榈油酸和二十四碳一烯酸的含量。棕榈油酸等不饱和脂肪酸 (UFA) 在加热过程中氧化产生香气,而硬脂酸也是肌肉中主要的风味前体物质之一,其含量越高,肉质风味越好<sup>[33]</sup>。因此,本试验结果提示添加芦丁可通过提高肌肉中多种不饱和脂肪酸及硬脂酸含量,增加鸡肉风味。SFA 含量过高会引起胆固醇沉积等心血管疾病,而 PUFA 含量提高不仅可增加肉质风味,还具有调节脂质代谢、缓解炎症反应,预防痴呆症和多种心血管疾病的作用,因此, SFA 和 PUFA 常用来评估肌肉的营养价值<sup>[34-36]</sup>。本试验结果表明,饲料中添加 500 和 1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 芦丁显著提高了肉鸡胸肌中 PUFA 含量,但对肉鸡胸肌中 SFA 含量没有显著影响。因此,芦丁可通过改变肌肉中脂肪酸的含量,进而改善肌肉的营养价值。其原因可能是芦丁中的酚羟基释放的氢与过氧化物

结合,通过阻止 PUFA 氧化,降低肌肉中脂肪酸的氧化程度<sup>[37]</sup>。

### 3.3 不同水平芦丁对肉鸡肌肉抗氧化功能的影响

氧化应激会对鸡肉的风味、肉色和营养价值造成不良影响,导致肉品质下降<sup>[38]</sup>。我们通过对胸肌抗氧化能力研究发现,饲料中添加 500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁显著降低了胸肌中 MDA 含量,提高了 T-SOD 活性。脂质氧化是肌肉氧化的方式之一,MDA 是脂质过氧化的重要产物,SOD 可通过转化高活性自由基超氧化物,减弱肌肉氧化作用<sup>[39-41]</sup>。本研究中,500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁可通过降低 MDA 含量与提高 T-SOD 活性来减少脂质过氧化,提高肌肉的抗氧化能力。此外,饲料中添加 500 mg·kg<sup>-1</sup>芦丁还显著提高了胸肌中 *Nrf2* 和 *SOD* mRNA 的表达量。*Nrf2* 可通过调节相关抗氧化基因表达来增强机体的抗氧化能力<sup>[42]</sup>,这与 Tian 等<sup>[43]</sup>在试验中发现腹腔注射芦丁可以增强大鼠抗氧化防御系统的结果一致;Shi 等<sup>[44]</sup>研究也表明饲料中添加黄酮类化合物黄酮素可通过激活小鼠肝脏中 *Nrf2* mRNA 的表达量,提高机体抗氧化能力。而 *SOD* mRNA 的表达量的提高与 T-SOD 活性增强的结果一致。肌肉抗氧化能力的提高可以通过抑制细胞膜上不饱和脂肪酸的过氧化作用,防止产生的自由基与细胞膜上的蛋白质结合引起膜结构改变,使细胞膜通透性增强,从而起到保水的作用<sup>[45]</sup>。肌肉抗氧化能力的提高也可通过提高肌红蛋白稳定性,改善肌肉色泽<sup>[46]</sup>,与本研究中芦丁可提高 PUFA 含量和改善肉品质的结果一致。芦丁对肌肉抗氧化功能的改善作用一方面是芦丁作为多酚类物质,本身具有抗氧化作用<sup>[47]</sup>;另一方面是芦丁通过激活 *Nrf2* 信号通路,上调相关抗氧化酶基因的表达,提高肌肉抗氧化能力<sup>[48]</sup>。

综上所述,饲料添加芦丁可通过激活 *Nrf2* 信号通路中相关基因的表达提高肉鸡肌肉抗氧化能力,而肌肉肉品质的提高与脂肪酸组成的变化与芦丁提高肌肉抗氧化能力有关。在本试验条件下,芦丁的适宜添加量为 500 mg·kg<sup>-1</sup>。因此,芦丁可改善肉鸡肌肉品质的作用在畜禽生产方面具有较高的应用前景。

#### 参考文献 References:

- [1] 邢通,王成赞,张林,等. 鸡肉风味物质的影响因素及其营养调控研究进展[J]. 动物营养学报,2021,33(6):3028-3035.  
Xing T, Wang C Z, Zhang L, et al. Research advance of factors affecting chicken meat flavor and its nutritional regulation[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(6):3028-3035 (in Chinese with English abstract).
- [2] 袁振中. 复合植物提取物对白羽肉鸡生长性能、屠宰性能、肉品质的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2021.  
Yuan Z Z. Effects of compound plant extracts on growth performance, slaughter performance and meat quality of white feathered broilers[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [3] Ma Y, Yang L, Ma J, et al. Rutin attenuates doxorubicin-induced cardiotoxicity via regulating autophagy and apoptosis[J]. Biochimica Et Biophysica Acta: Molecular Basis of Disease, 2017, 1863(8):1904-1911.
- [4] Chua L S. A review on plant-based rutin extraction methods and its pharmacological activities[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2013, 150(3):805-817.
- [5] Negahdari R, Bohlouli S, Sharifi S, et al. Therapeutic benefits of rutin and its nanoformulations[J]. Phytotherapy Research, 2021, 35(4):1719-1738.
- [6] de Queiroz-Pimentel R B, da Costa C A, Albuquerque P M, et al. Antimicrobial activity and rutin identification of honey produced by the stingless bee *Melipona compressipes manausensis* and commercial honey[J]. Bmc Complementary and Alternative Medicine, 2013, 13:151.
- [7] Arjumand W, Seth A, Sultana S. Rutin attenuates cisplatin induced renal inflammation and apoptosis by reducing NF kappa B, TNF-alpha and caspase-3 expression in wistar rats[J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49(9):2013-2021.
- [8] Gao M, Ma Y, Liu D. Rutin suppresses palmitic acids-triggered inflammation in macrophages and blocks high fat diet-induced obesity and fatty liver in mice[J]. Pharmaceutical Research, 2013, 30(11):2940-2950.
- [9] Chen S, Liu H, Zhang J, et al. Effects of different levels of rutin on growth performance, immunity, intestinal barrier and antioxidant capacity of broilers[J]. Italian Journal of Animal Science, 2022, 21(1):1390-1401.
- [10] Seo S, Lee M S, Chang E, et al. Rutin increases muscle mitochondrial biogenesis with ampk activation in high-fat diet-induced obese rats[J]. Nutrients, 2015, 7(9):8152-8169.
- [11] Baldissera M D, Souza C F, Parmeggiani B, et al. Protective effects of diet containing rutin against trichlorfon-induced muscle bioenergetics disruption and impairment on fatty acid profile of silver catfish *Rhamdia quelen*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 205:111127.
- [12] Da Rosa V M, Ariotti K, Bressan C A, et al. Dietary addition of rutin impairs inflammatory response and protects muscle of silver catfish (*Rhamdia quelen*) from apoptosis and oxidative stress in *Aeromonas hydrophila*-induced infection[J]. Comparative Biochemistry and Physiology C: Toxicology & Pharmacology, 2019, 226:108611.
- [13] Hassan F A M, Roushdy E M, Kishawy A T Y, et al. Growth performance, antioxidant capacity, lipid-related transcript expression and the economics of broiler chickens fed different levels of rutin[J]. Animals, 2019, 9(1):7.

- [14] 唐宇杰,卢浩诚,韩兆玉,等. 芦丁对热应激奶牛生产性能的影响[J]. 南京农业大学学报,2021,44(6):1144-1153. DOI:10.7685/jnau.202012023.  
Tang Y J,Lu H C,Han Z Y,et al. Effects of rutin on production performance of dairy cows under heat stress[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2021,44(6):1144-1153(in Chinese with English abstract).
- [15] 王海波,古今舜,霍俊宏,等. 饲料添加芦丁对湖羊血清免疫和抗氧化指标以及肌肉成分的影响[J]. 动物营养学报,2022,34(4):2504-2513.  
Wang H B,Zhan J S,Huo J H,et al Effects of dietary rutin on serum immune and antioxidant indices and muscle composition of Hu sheep[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2022,34(4):2504-2513(in Chinese with English abstract).
- [16] 王雨雨,刘强,王保哲,等. 凹凸棒石黏土对饲料颗粒质量及樱桃谷肉鸭生长性能、屠宰性能、肌肉品质和抗氧化性能的影响[J]. 南京农业大学学报,2018,41(3):511-518. DOI:10.7685/jnau.201710002.  
Wang Y Y,Liu Q,Wang B Z,et al. Effect of different levels of palygorskite supplementation on pellet quality, growth performance, slaughter performance, meat quality and antioxidant ability in Cherry Valley ducks[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2018,41(3):511-518(in Chinese with English abstract).
- [17] 黄子信,吴美丹,周光宏,等. 低场核磁共振测定鲜猪肉中水分分布的制样方法[J]. 食品安全质量检测学报,2017,8(6):2006-2011.  
Huang Z X,Wu M D,Zhou G H,et al. Sample method for low field nuclear magnetic resonance measurement of moisture distribution in pork[J]. Journal of Food Safety & Quality,2017,8(6):2006-2011(in Chinese with English abstract).
- [18] Yu C,Zhang J,Li Q,et al. Effects of trans-anethole supplementation on serum lipid metabolism parameters, carcass characteristics, meat quality, fatty acid, and amino acid profiles of breast muscle in broiler chickens[J]. Poultry Science,2021,100(12):101484.
- [19] 刘慧娟,张佳琦,庄苏,等. 日粮添加姜黄素对 IUGR 猪肝脏抗氧化功能和脂代谢的影响[J]. 南京农业大学学报,2022,45(2):359-367. DOI:10.7685/jnau.202104005.  
Liu H J,Zhang J Q,Zhuang S,et al. Effects of dietary curcumin on liver antioxidant function and lipid metabolism in IUGR pig[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2022,45(2):359-367(in Chinese with English abstract).
- [20] Livak K J,Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2(T)(-delta delta C) method[J]. Methods,2001,25(4):402-408.
- [21] Fernandez-Barroso M A,Silio L,Rodriguez C,et al. Genetic parameter estimation and gene association analyses for meat quality traits in open-air free-range Iberian pigs[J]. Journal of Animal Breeding and Genetics,2020,137(6):581-598.
- [22] El Rammouz R,Berri C,Le Bihan-Duval E,et al. Breed differences in the biochemical determinism of ultimate pH in breast muscles of broiler chickens: A key role of AMP deaminase? [J]. Poultry Science,2004,83(8):1445-1451.
- [23] 董亚维. 高温对 AA 肉鸡和北京油鸡生产性能及肌肉品质风味的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.  
Dong Y W. Effects of high temperature on performance, meat quality and meat flavor of AA broilers and Beijing fatty chickens[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University,2006(in Chinese with English abstract).
- [24] 郑旭. 槲皮万寿菊素对肉鸡生长性能、肉品质及抗氧化能力的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2022.  
Zhang X. Effects of quercetin on growth performance, meat quality and antioxidant capacity of broilers[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2022(in Chinese with English abstract).
- [25] Aaslyng M D,Bejerholm C,Ertbjerg P,et al. Cooking loss and juiciness of pork in relation to raw meat quality and cooking procedure[J]. Food Quality and Preference,2003,14(4):277-288.
- [26] 李培峰,魏清宇,叶红心,等. 边鸡肌肉品质的研究[J]. 动物营养学报,2016,28(7):2221-2227.  
Li P F,Wei Q Y,Ye H X,et al. Research on meat quality of Bian chickens[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2016,28(7):2221-2227(in Chinese with English abstract).
- [27] Ouyang K,Xu M,Jiang Y,et al. Effects of alfalfa flavonoids on broiler performance, meat quality, and gene expression[J]. Canadian Journal of Animal Science,2016,96(3):332-341.
- [28] 姜义宝,杨玉荣,王成章,等. 红车轴草异黄酮对肉鸡生产性能及肉品质的影响[J]. 草业科学,2011,28(11):2032-2036.  
Jiang Y B,Yang Y R,Wang C Z,et al. Effects of red clover isoflavone on production performance and meat quality in broilers[J]. Pratacultural Science,2011,28(11):2032-2036(in Chinese with English abstract).
- [29] 杨密,宋宇朵,陈瑞,等. 饲料甜菜碱水平对雪山草鸡腿肌肉品质、糖酵解水平和抗氧化能力的影响[J]. 南京农业大学学报,2022,45(3):578-586. DOI:10.7685/jnau.202107009.  
Yang M,Song Y D,Chen R,et al. Effects of dietary betaine levels on meat quality, glycolysis level and antioxidant ability of Xueshan chicken[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2022,45(3):578-586(in Chinese with English abstract).
- [30] Bertram H C,Purslow P P,Andersen H J. Relationship between meat structure, water mobility, and distribution: a low-field nuclear magnetic resonance study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2002,50(4):824-829.
- [31] 吴焯,许柯,徐幸莲,等. 低场核磁共振研究 pH 值对兔肌球蛋白热凝胶特性的影响[J]. 食品科学,2010,31(9):6-11.  
Wu H,Xu K,Xu X L,et al. Effect of pH on gelation properties of rabbit myosin[J]. Food Science,2010,31(9):6-11(in Chinese with English abstract).
- [32] Wood J D,Enser M,Fisher A V,et al. Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: a review[J]. Meat Science,2008,78(4):343-358.

- [33] 李雪花,刘震,杜文兴,等. 萨索鸡与AA肉鸡肌肉脂肪酸组成的比较[J]. 畜牧与兽医,2022,54(5):19-25.  
Li X H,Liu Z,Du W X,et al. Comparison of fatty acid composition in skeletal muscles between SASSO chickens and AA broilers[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*,2022,54(5):19-25(in Chinese with English abstract).
- [34] Park Y W,Washington A C. Fatty-acid composition of goat organ and muscle meat of alpine and nubian breeds[J]. *Journal of Food Science*,1993,58(2):245-248.
- [35] Khan M I,Jo C,Tariq M R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors;a systematic review[J]. *Meat Science*,2015,110:278-284.
- [36] Harwood J L. Algae:critical sources of very long-chain polyunsaturated fatty acids[J]. *Biomolecules*,2019,9(11):708.
- [37] 何万红,万五星. 多不饱和脂肪酸氧化酸败的解决方法[J]. 中国饲料,2001(15):29-30.  
He W H,Wan W X. Solutions to oxidative rancidity of polyunsaturated fatty acids[J]. *China Feed*,2001(15):29-30(in Chinese with English abstract).
- [38] Alirezaei M,Gheisari H R,Ranjbar V R,et al. Betaine;a promising antioxidant agent for enhancement of broiler meat quality[J]. *British Poultry Science*,2012,53(5):699-707.
- [39] Cheng K,Yu C,Li Z,et al. Resveratrol improves meat quality,muscular antioxidant capacity,lipid metabolism and fiber type composition of intrauterine growth retarded pigs[J]. *Meat Science*,2020,170:108237.
- [40] Del Rio D,Stewart A J,Pellegrini N. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress[J]. *Nutrition Metabolism and Cardiovascular Diseases*,2005,15(4):316-328.
- [41] Liu Y H,Zhang Z B,Zheng Y F,et al. Gastroprotective effect of andrographolide sodium bisulfite against indomethacin-induced gastric ulceration in rats[J]. *International Immunopharmacology*,2015,26(2):384-391.
- [42] Lu Z,He X,Ma B,et al. Dietary taurine supplementation improves breast meat quality in chronic heat-stressed broilers via activating the Nrf2 pathway and protecting mitochondria from oxidative attack[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,2019,99(3):1066-1072.
- [43] Tian R,Yang W,Xue Q,et al. Rutin ameliorates diabetic neuropathy by lowering plasma glucose and decreasing oxidative stress via Nrf2 signaling pathway in rats[J]. *European Journal of Pharmacology*,2016,771:84-92.
- [44] Shi L,Hao Z,Zhang S,et al. Baicalein and baicalin alleviate acetaminophen-induced liver injury by activating Nrf2 antioxidative pathway:the involvement of ERK1/2 and PKC[J]. *Biochemical Pharmacology*,2018,150:9-23.
- [45] 姜晓文. 肌肉水分分布、抗氧化性与生鲜猪肉持水性的关系[D]. 杭州:浙江工商大学,2009.  
Jiang X W. Relationship between water distribution,antioxidant and water-holding capacity in fresh pork meat [D]. Hangzhou:Zhejiang Gongshang University,2009(in Chinese with English abstract).
- [46] Faustman C,Sun Q,Mancini R,et al. Myoglobin and lipid oxidation interactions;mechanistic bases and control[J]. *Meat Science*,2010,86(1):86-94.
- [47] Lambert J D,Elias R J. The antioxidant and pro-oxidant activities of green tea polyphenols;a role in cancer prevention[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*,2010,501(1):65-72.
- [48] Tonelli C,Chio C,Tuveson D A. Transcriptional regulation by Nrf2[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*,2018,29(17):1727-1745.

责任编辑:周广礼