



李贞明, 宋慧敏, 余苗, 马现永, 邓盾, 宋敏, 刘志昌, 陈卫东, 容庭. 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血液指标的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10): 208-219.

LI Zhenming, Song Huimin, YU Miao, MA Xianyong, DENG Dun, SONG Min, LIU Zhichang, CHEN Weidong, RONG Ting. Effect of combined supplementation with sodium humate and acidifier on blood indicators of yellow-feathered broilers[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 208-219.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.18

联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血液指标的影响

李贞明¹ 宋慧敏^{2*} 余苗^{1,3} 马现永¹ 邓盾¹ 宋敏¹ 刘志昌¹
陈卫东³ 容庭^{1*}

1. 广东省农业科学院 动物科学研究所/农业农村部华南动物营养与饲料重点实验室/广东省畜禽育种与营养研究重点实验室/广东省畜禽肉品质量安全控制与评定工程技术研究中心, 广州 510640;
2. 猪禽种业全国重点实验室, 广州 510640;
3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心, 广东 河源 517000

摘要 为分析饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆生化指标、抗氧化能力、免疫功能和游离氨基酸的影响,本研究选取540只42日龄的黄羽肉鸡,按照体重随机分成3组,每组6个重复,每个重复30只。对照组饲喂无抗生素的基础饲料,试验组分别饲喂联合添加0.5%和1%腐殖酸钠和酸化剂的试验饲料。试验为期21d,试验结束时,每个重复选2只鸡进行采血,测定血液生化指标、抗氧化能力、免疫功能和游离氨基酸的含量。结果表明:1)与对照组相比,0.5%组黄羽肉鸡的血浆中总蛋白(TP)和葡萄糖(GLU)的含量极显著提高($P<0.01$),谷丙转氨酶(ALT)活性和尿素(UREA)的含量则显著降低($P<0.05$);1%组黄羽肉鸡血浆中总蛋白(TP)和葡萄糖(GLU)的含量极显著提高($P<0.01$)。与对照组和1%组相比,0.5%组肉鸡血浆中高密度脂蛋白(HDL)的含量极显著降低($P<0.01$)。2)与对照组相比,0.5%组肉鸡血浆的总抗氧化能力(T-AOC)显著提高($P<0.05$)。与对照组和1%组相比,0.5%组肉鸡血浆中丙二醛(MDA)的含量极显著降低($P<0.01$)。3)与对照组相比,0.5%组肉鸡血浆中白细胞介素-22(IL-22)和免疫球蛋白A(IgA)的含量显著提高($P<0.05$);0.5%组和1%组肉鸡血浆中免疫球蛋白M(IgM)的含量极显著提高($P<0.01$)。4)与对照组相比,0.5%和1%组肉鸡血浆中赖氨酸(Lys)、缬氨酸(Val)、天冬氨酸(Asp)、丝氨酸(Ser)和必需氨基酸(EAA)的含量极显著提高($P<0.01$)。与1%组相比,对照组和0.5%组肉鸡血浆中组氨酸(His)的含量显著提高($P<0.05$);此外,0.5%组肉鸡血浆中Lys、Asp、Ser和EAA的浓度极显著提高($P<0.01$)。与对照组和1%组相比,0.5%组肉鸡血浆中亮氨酸(Leu)、蛋氨酸(Met)、丙氨酸(Ala)和脯氨酸(Pro)含量显著提高($P<0.05$),异亮氨酸(Ile)、苏氨酸(Thr)、非必需氨基酸(NEAA)和总氨基酸(TAA)的含量极显著提高($P<0.01$)。综上,饲料联合添加一定比例的腐殖酸钠和酸化剂可有效改善黄羽肉鸡机体内的代谢水平,提高血浆游离氨基酸水平,增强机体抗氧化能力和免疫功能,且添加0.5%的效果优于1%。

关键词 肉鸡; 腐殖酸钠; 酸化剂; 抗氧化; 免疫功能; 氨基酸

中图分类号 S831.5

文章编号 1007-4333(2024)10-0208-12

文献标志码 A

收稿日期: 2024-02-02

基金项目: 广东省科技计划项目(2023B0202010020); 猪禽种业全国重点实验室项目(2023QZ-NK09); 广东省清远市清城区现代农业产业园项目; 岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心自主科研项目(DT20220022); 清远市科技计划项目(2021DZX018); 江门市科技计划项目(2021660200370006997)

作者简介: 李贞明(0009-0002-6988-3385), 硕士研究生, E-mail: lzm900120@163.com

通讯作者: 容庭(0009-0004-4805-6529), 副研究员, 主要从事生态健康养殖与环境控制研究, E-mail: rongting@gdaas.cn

宋慧敏(0009-0006-5794-4362), 助理研究员, 主要从事农业资源与环境经济评价及研究工作, E-mail: songhuimin@gdaas.cn

Effect of combined supplementation with sodium humate and acidifier on blood indicators of yellow-feathered broilers

LI Zhenming¹, Song Huimin^{2*}, YU Miao^{1,3}, MA Xianyong¹, DENG Dun¹, SONG Min¹,
LIU Zhichang¹, CHEN Weidong³, RONG Ting^{1*}

(1. Institute of Animal Science/Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science in South China of Ministry of Agriculture/
Guangdong Public Laboratory of Animal Breeding and Nutrition/Guangdong Engineering Technology Research Center of
animal Meat quality and Safety Control and Evaluation, Guangdong Academy of Agricultural Sciences,

Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Swine and Poultry Breeding Industry, Guangzhou 510640, China;

3. Heyuan Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agricultural Science and Technology,
Heyuan 517000, China)

Abstract In order to investigate the effects of dietary combined supplementation with sodium humate and acidifier on plasma biochemical indexes, antioxidant capacity, immune function and free amino acids of yellow-feathered broilers. In this study, a total of 540 yellow-feathered broilers aged 42 days were selected and randomly divided into three groups according to body weight with six replicates and 30 replicates each. The control group was fed the basal diet without antibiotics, and the test group was fed the test diets supplemented with 0.5% and 1% compound acidulants, respectively. The test was 21 d, and at the end of the test, two chickens per replicate were selected for blood collection and blood biochemical indices, antioxidant capacity, immune function and free amino acid content were determined. The results showed that: 1) Compared with the control group, the plasma levels of total protein (TP) and glucose (GLU) in yellow-feathered broilers in the 0.5% group were highly significantly increased ($P < 0.01$), while the levels of alanine aminotransferase (ALT) activity and urea (UREA) were significantly decreased ($P < 0.05$); in the 1% group the plasma levels of total protein (TP) and glucose (GLU) in yellow-feathered broilers were highly significantly increased ($P < 0.01$). Compared with the control and 1% groups, the plasma content of high-density lipoprotein (HDL) in broilers in the 0.5% group was highly significantly decreased ($P < 0.01$). 2) Compared with the control group, the total antioxidant capacity (T-AOC) of broiler plasma in the 0.5% group was significantly increased ($P < 0.05$). Compared with the control and 1% groups, malondialdehyde (MDA) content of broiler plasma was highly significantly reduced in the 0.5% group ($P < 0.01$). 3) Compared with the control group, the content of interleukin-22 (IL-22) and immunoglobulin A (IgA) in the plasma of broilers in the 0.5% group was significantly increased ($P < 0.05$); the content of broiler plasma and immunoglobulin M (IgM) in the 0.5% and 1% groups were highly significantly increased ($P < 0.01$). 4) Compared with the control group, the content of lysine (Lys), valine (Val), aspartic acid (Asp), serine (Ser) and essential amino acids (EAA) in the plasma of broilers in the 0.5% and 1% groups was highly significantly increased ($P < 0.01$). Compared with the 1% group, the content of histidine (His) in the plasma of broilers in the control and 0.5% groups was significantly increased ($P < 0.05$); moreover, the concentrations of Lys, Asp, Ser and EAA in the plasma of broilers in the 0.5% group were highly significant ($P < 0.01$). Compared with the control and 1% groups, the content of leucine (Leu), methionine (Met), alanine (Ala) and proline (Pro) in the plasma of broilers in the 0.5% group was significantly increased ($P < 0.05$), and the content of isoleucine (Ile), threonine (Thr), non-essential amino acids (NEAA), and total amino acids (TAA) were highly significantly increased ($P < 0.01$). In summary, dietary supplementation with certain percentage of sodium humate and acidifier can effectively improve the yellow-feathered broiler's metabolic level in the organism, improve plasma free amino acid level, and enhance the organism's antioxidant ability and immune function, and the effect of adding 0.5% is better than 1%.

Keywords broiler; sodium humate; acidifiers; antioxidant; immunity; amino acid

腐殖酸钠是一种有机弱酸盐,极易溶于水,是利用化学方法从褐煤、风化煤和泥炭中提取出来的一种有机弱酸盐^[1]。腐殖酸钠作为一种高分子化合物,具有较大的表面积,含有丰富的生物碱、维生素和生物活性物质,具有较强的络合力、离子交换作用、吸附作用和氧化还原能力等^[2-3]。此外,腐殖酸钠富含多种功能性基团(羟基、羧基、酚基和醌基等),具有抗菌、抗炎、抗氧化和免疫调节等功能^[4-6]。目前,在畜禽养殖业中,腐殖酸钠通常被用于治疗畜禽的消化不良、腹泻和急性中毒。酸化剂主要由酸和酸盐组成,可分为有机酸化剂、无机酸化剂和复合酸化剂。酸化剂在畜禽养殖业中已有几十年的历史,通常应用于畜禽饲料和饮水中^[7]。研究表明,酸化剂具有提高畜禽生长性能、维持肠道健康,促进营养物质消化吸收和增强机体抗氧化和免疫能力的功能^[8-10]。Akaichi等^[11-12]研究表明,饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂可显著改善肉鸡的肉品质,并提高机体免疫功能。Aristimunha等^[13]研究表明,饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂可有效改善肉鸡肠道结构,增强肠道屏障功能,提高机体免疫力。Edmonds等^[14]在肉鸡饲料中添加腐殖酸钠和酸化剂,在热应激的环境中,可显著改善肉鸡的生长性能,并降低死亡率。

血液是宿主机体运输氧气、代谢物质和免疫因子等的重要载体,其中血液生化、抗氧化和免疫等指标反映了宿主机体代谢水平和健康状况,因此,血液指标对于评价宿主机体是否遭外界受感染和是否存在潜在疾病尤为重要^[15-16]。研究表明,饲料补充适量的腐殖酸钠或有机酸可有效调节宿主机体的代谢功能,改善宿主的健康状况^[17-18]。目前,国内对于腐殖酸钠和酸化剂的研究均集中在单独使用,而对于联合使用腐殖酸钠和酸化剂的研究相对较少。前期研究发现,联合使用腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡的生长性能、器官指数、肌肉抗氧化能力和肉品质^[19]。但是否可以有效调节黄羽肉鸡的血液指标,改善肉鸡机体的健康水平尚未可知。因此,通过在饲料中联合添加不同比例的腐殖酸钠和酸化剂,研究其对肉鸡血浆生化指标、抗氧化能力、免疫功能和游离氨基酸含量的影响,旨在为其在肉鸡生产中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

按照5:4:1的比例将腐殖酸钠、柠檬酸钙和乳酸钙混合均匀,形成腐殖酸钠和酸化剂的联合添加剂。其中,腐殖酸钠(河南某化工有限公司)中水溶性腐殖酸含量(干物质基础) $\geq 70\%$;食品级柠檬酸钙(山东某食品科技有限公司)纯度 $\geq 98\%$;食品级乳酸钙(上海某生物科技有限公司)纯度 $\geq 99\%$ 。

选取540只42日龄的快大型黄羽肉鸡(母鸡),平均体重 $(1\,053.22 \pm 0.17)$ g,按照体重随机分为3组,每组6个重复,每个重复30只鸡,正试期3周。

1.2 试验设计

对照组饲喂玉米-豆粕型基础饲料,试验组饲喂在基础饲料中分别联合添加0.5%的腐殖酸钠和酸化剂(0.5%组)及1%的腐殖酸钠和酸化剂(1%组)的试验饲料。基础饲料参照NRC(2012)并结合中国农业行业标准《黄羽肉鸡仔鸡营养需要》(NY/T33-2004)进行配制。

1.3 试验饲料

基础饲料组成及营养水平见表1。

1.4 饲养管理和样品采集

动物试验在广东省农业科学院动物科学研究所试验场进行,采用地面平养模式进行饲养,试验期间肉鸡自由采食和饮水,并按照常规饲养程序和免疫程序进行饲养管理和免疫。

试验肉鸡饲养至63日龄时,空腹禁食12 h后,每个重复挑选2只,每组12只,共36只肉鸡进行采血试验。采用翅静脉采血的方式用EDTA-抗凝管进行采血,每只肉鸡采集10 mL,上下颠倒混匀后,离心 $(3\,000\text{ r/min})10\text{ min}$,随后分离血浆并分装,置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,用于检测血液相关指标。

1.5 指标检测

1.5.1 血浆生化指标

按照试剂盒说明书(中生北控生物科技股份有限公司),使用全自动生化分析仪(SELECTRA Pro XL型,威图,荷兰)检测肉鸡血浆中总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、尿素(UREA)、尿酸(UA)、葡萄糖(GLU)、甘油三酯(TG)、胆固醇(CHO)、高密度脂蛋白(HDL)和低密度脂蛋白(LDL)的含量以及谷丙转氨酶(ALT)和谷草转氨酶(AST)的活性。

表 1 43~63 日龄黄羽肉鸡基础饲粮组成及营养水平(饲喂基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of basal diets for yellow-feathered broilers at 43 to 63 days of age (as-fed basis)

原料 Ingredient	含量 Content	营养水平 Nutrient level ²⁾	含量 Content
玉米/% Corn	66.45	总磷/% TP	0.57
豆粕/% Soybean meal	21.50	有效磷/% AP	0.34
玉米蛋白粉/% Corn gluten meal	4.00	钙/% Ca	0.81
豆油/% Soybean oil	4.00	赖氨酸/% Lys	0.85
赖氨酸/% Lys	0.05	蛋氨酸/% Met	0.40
蛋氨酸/% Met	0.03	粗蛋白质/% CP	17.59
石粉/% Limestone	1.90	代谢能 ME/(MJ/kg)	12.57
磷酸氢钙/% CaHPO ₄	0.77		
食盐/% NaCl	0.30		
预混料/% Premix ¹⁾	1.00		
合计 Total	100.00		

注:1)预混料可为每千克饲粮提供:D-泛酸 10.9 mg;生物素 0.16 mg;烟酸 30 mg;叶酸 0.95 mg;维生素 A 8 000 IU;维生素 B1 1.7 mg;维生素 B2 8.2 mg;维生素 B6 2.78 mg;维生素 B12 0.015 mg;维生素 D 2 800 IU,维生素 E 19 mg;维生素 K3 3.32 mg;铜(CuSO₄·5H₂O) 9 mg;铁(FeSO₄·7H₂O) 81 mg;碘(KI) 0.5 mg;锰(MnSO₄·H₂O) 82 mg;硒(Na₃SeO₃) 0.27 mg;锌(ZnSO₄·7H₂O) 68 mg。2)粗蛋白、代谢能为实测值,其余为计算值。

Note: 1) The premix provided the following per kg of diets: D-pantothenic acid 10.9 mg; biotin 0.16 mg; nicotinic acid 30 mg; folic acid 0.95 mg; Vitamin A 8 000 IU; Vitamin B1 1.7 mg; Vitamin B2 8.2 mg; Vitamin B6 2.78 mg; Vitamin B12 0.015 mg; Vitamin D 2 800 IU, Vitamin E 19 mg; Vitamin K3 3.32 mg; Cu(CuSO₄·5H₂O) 9 mg; Fe(FeSO₄·7H₂O) 81 mg; I(KI) 0.5 mg; Mn(MnSO₄·H₂O) 82 mg; Se(Na₃SeO₃) 0.27 mg; Zn(ZnSO₄·7H₂O) 68 mg. 2) CP and ME was a measured value and others were calculated values.

1.5.2 抗氧化指标

按照试剂盒(南京建成生物工程研究所)说明书检测肉鸡血浆中过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)和总抗氧化能力(T-AOC)的活性以及丙二醛(MDA)的含量。

1.5.3 免疫指标

按照 ELISA 试剂盒(上海酶联生物科技有限公司)说明书检测肉鸡血浆中白细胞介素-8(IL-8)、白细胞介素-10(IL-10)、白细胞介素-22(IL22)、干扰素-γ(IFN-γ)、肿瘤坏死因子-α(TNF-α)、免疫球蛋白 A(IgA)、免疫球蛋白 G(IgG)和免疫球蛋白 M(IgM)的含量。

1.5.4 游离氨基酸谱

取 300 μL 血浆样品,加入 900 μL 10% 的磺基水杨酸钠(V/V),混合均匀,4℃,12 000 r/min 离心 10 min,吸取上清用 0.22 μm 水相滤膜过滤至样品瓶中,使用全自动氨基酸分析仪(L8900,日立,日本)进行分析,并计算必需氨基酸,非必需氨基酸和

总氨基酸含量。

1.6 数据处理

血生化指标、抗氧化能力、免疫功能和游离氨基酸的数据均以重复组为统计单位。采用 SPSS 20.0 进行单因子方差分析(One-way ANOVA, LSD),并以 Duncan 氏法进行多重比较检验。所有数据均表示为平均值±标准误, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著, $P>0.05$ 表示差异不显著。

2 结果与分析

2.1 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆生化指标的影响

由表 2 可知,与对照组相比,饲粮添加 0.5% 和 1% 的腐殖酸钠和酸化剂可极显著提高黄羽肉鸡血浆中 TP 和 GLU 的含量($P<0.01$)。与对照组相比,饲粮添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可显著降低肉鸡血浆中 ALT 的活性以及 UREA 的含量($P<0.05$)。与对照组和 1% 组相比,饲粮添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可极显著提高肉鸡血浆中 HDL 的含量($P<0.01$)。不同

表2 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆生化指标的影响

Table 2 Effect of combined addition of sodium humate and acidifier on plasma biochemical indexes of yellow-feathered broilers

项目 Item	对照组 Control group	0.5% 组 0.5% group	1% 组 1% group	P 值 P value
总蛋白/(g/L) TP	40.47±0.67 Bb	44.09±0.66 Aa	42.78±0.25 Aa	0.001
白蛋白/(g/L) ALB	17.11±0.85	18.65±0.67	17.59±0.50	0.302
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	3.180±0.23 a	2.43±0.12b	2.69±0.20 ab	0.041
谷草转氨酶/(U/L) AST	238.22±3.36	225.64±4.73	236.18±5.36	0.146
尿素/(mmol/L) UREA	1.38±0.09 a	1.07±0.08 b	1.22±0.06 ab	0.036
尿酸/(μmol/L) UA	131.21±6.90	138.57±6.58	145.92±5.07	0.279
葡萄糖/(mmol/L) GLU	13.8±0.49 Bb	15.59±0.43 Aa	15.59±0.20 Aa	0.008
甘油三酯/(mmol/L) TG	0.46±0.07	0.46±0.04	0.52±0.07	0.742
胆固醇/(mmol/L) CHO	2.82±0.12	3.31±0.30	2.95±0.20	0.306
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL	1.34±0.04 Bb	1.55±0.03 Aa	1.44±0.04 Bb	0.002
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL	0.37±0.02	0.38±0.02	0.40±0.03	0.597

注:同行无字母或相同字母表示差异不显著($P>0.05$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。下同。

Note: In the same row, values with no letter or same letter mean no significant difference ($P>0.05$), while with different small letter mean significant difference($P<0.05$), and with diffrent capital letter mean significant difference ($P<0.01$). The same below.

饲料处理对黄羽肉鸡血浆中ALB、UA、TG、CHO和

2.2 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆抗氧化能力的影响

由表3可知,与对照组和1%组相比,饲料添加0.5%的腐殖酸钠和酸化剂可极显著降低黄羽肉鸡血浆中MDA的含量($P<0.01$)。与对照

LDL的含量以及AST的活性无显著性影响($P>0.05$)。组相比,饲料添加0.5%的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡血浆中T-AOC的活性($P<0.05$)。不同饲料处理对黄羽肉鸡血浆中CAT、GSH-Px和T-SOD的活性无显著性影响($P>0.05$)。

表3 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆抗氧化能力的影响

Table 3 Effect of combined addition of sodium humate and acidifier on plasma antioxidant capacity of yellow-feathered broilers

项目 Item	对照组 Control group	0.5% 组 0.5% group	1% 组 1% group	P 值 P value
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	5.78±0.18	6.09±0.16	5.87±0.18	0.459
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/mL) GSH-Px	2 650.86±26.96	2 635.58±21.12	2 618.90±30.93	0.704
总超氧化物歧化酶/(U/mL) T-SOD	464.30±11.01	484.20±15.12	471.40±11.37	0.543
丙二醛/(nmol/mL) MDA	0.59±0.02Aa	0.47±0.01Bb	0.62±0.03Aa	0.001
总抗氧化能力/(U/mL) T-AOC	5.35±0.15b	6.04±0.18a	5.84±0.18ab	0.036

2.3 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆免疫功能的影响

由表4可知,与对照组和1%组相比,饲料添加0.5%的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高黄

羽肉鸡血浆中IL-22的含量($P<0.05$)。与对照组相比,饲料添加0.5%的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡血浆中IgA的含量($P<0.05$)。与对照组相比,饲料添加0.5%和1%的腐殖酸钠

表 4 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆免疫功能的影响

项目 Item	对照组 Control group	0.5% 组 0.5% group	1% 组 1% group	P 值 P value
白细胞介素-8/(pg/mL) IL-8	83.06±1.82	82.43±2.12	81.57±1.89	0.864
白细胞介素-10/(pg/mL) IL-10	44.01±0.87	45.05±0.80	45.14±0.79	0.571
白细胞介素-22/(pg/mL) IL22	178.29±5.06b	205.08±5.42a	192.72±5.86ab	0.012
干扰素-γ/(pg/mL) IFN-γ	33.12±2.84	35.83±3.54	37.32±2.63	0.619
肿瘤坏死因子-α/(pg/mL) TNF-α	62.66±2.19	59.50±2.16	59.43±4.22	0.694
免疫球蛋白 A/(μg/mL) IgA	173.83±5.66b	199.51±7.80a	183.42±5.88ab	0.041
免疫球蛋白 G/(μg/mL) IgG	1 417.30±30.31	1 404.55±33.17	1 419.61±36.50	0.943
免疫球蛋白 M/(μg/mL) IgM	608.13±27.61Bb	740.18±25.98Aa	728.39±30.42Aa	0.008

和酸化剂可极显著提高黄羽肉鸡血浆中 IgM 的含量($P<0.01$)。不同饲料处理对黄羽肉鸡血浆中 IL-8、IL-10、IFN- γ 、TNF- α 和 IgG 的含量($P>0.05$)。

2.4 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆游离氨基酸含量的影响

由表 5 可知,与对照组和 1% 组相比,饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可极显著提高肉鸡血浆中 TAA 的浓度($P<0.01$)。在 EAA 中,与 1% 组相比,对照组和 0.5% 组肉鸡血浆中 His 的浓度显著提高($P<0.05$)。与对照组和 1% 组相比,饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡血浆中 Leu 和 Met 的浓度($P<0.05$),极显著提高 Ile、Lys、Thr 和 EAA 的浓度($P<0.01$)。与对照组相比,饲料联合添加 1% 的腐殖酸钠和酸化剂可极显著提高肉鸡血浆中 Lys 的浓度($P<0.01$);0.5% 和 1% 组肉鸡血浆中 Val 和 EAA 的浓度极显著提高($P<0.01$)。在 NEAA 中,与对照组和 1% 组相比,饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡血浆中 Ala 和 Pro 的浓度($P<0.05$),极显著提高 Asp、Ser 和 NEAA 的浓度($P<0.01$)。与对照组相比,饲料联合添加 1% 的腐殖酸钠和酸化剂可极显著提高肉鸡血浆中 Asp 和 Ser 的浓度($P<0.01$)。不同饲料处理对黄羽肉鸡血浆中 Arg、Phe、Trp、Asn、Cys、Glu、Gln、Gly 和 Tyr 的浓度均无显著影响($P>0.05$)。

3 讨 论

3.1 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆生化指标的影响

血浆生化指标是反映畜禽机体内物质代谢水平

的重要指标。TP、ALB 和 UREA 是反映畜禽机体蛋白质代谢的主要指标,其中 TP 含量升高表示蛋白质的合成代谢旺盛,有助于提高畜禽的生产性能;UREA 是蛋白质分解的产物之一,其含量的降低,有助于蛋白质的沉积^[20-21]。Akaichi 等^[12]的研究结果表明,饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂对肉鸡的血液生化指标无显著影响,这与本研究结果不一致,这可能与添加的配比、构成成分、添加剂量、饲养动物、饲养环境和样本数量等有关。在本研究中,饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂显著提高了黄羽肉鸡血浆中 TP 的含量,并降低了 UREA 的含量。王凯英等^[21]研究表明,血液中 TP 含量与饲料蛋白水平和表观消化率有关以及健康状况(机体大量失水等)有关;还发现,适量酸化剂有助于蛋白质合成。在本研究中,饲料的营养水平和肉鸡机体的健康状况均属于正常水平,因此,肉鸡血浆中 TP 含量升高与营养物质表观消化率提高有关;而 UREA 含量降低可能是酸化剂促进机体蛋白质的合成,降低了 UREA 的浓度。

ALT 和 AST 是氨基酸代谢过程中的重要酶,且在肝脏中有较高的活性,当肝脏细胞受损或通透性增加时,ALT 和 AST 会随细胞流入血液,致使血液中 ALT 和 AST 活性增加,因此,血浆中 ALT 和 AST 活性是反映畜禽机体肝功能状态的一个重要指标^[22-23]。王铭洋等^[23]研究发现,酸化剂可以显著降低蛋鸡血液中 ALT 和 AST 的活性,有效缓解蛋鸡的肝脏损伤。在本研究中,饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可显著降低肉鸡血浆中 ALT 的活性,且对 AST 无显著影响,表明饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂不会损伤肝细胞,给肉鸡机体带来不良影响。

血浆中 TG、CHO、HDL 和 LDL 浓度是评价畜

表5 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆游离氨基酸含量的影响

Table5 Effect of combined addition of sodium humate and acidifier on plasma free amino acid content of yellow-feathered broilers $\mu\text{mol/L}$

项目 Item	对照组 Control group	0.5% 组 0.5% group	1% 组 1% group	P 值 P value
必需氨基酸 EAA	2 390.76±43.36Cc	2 892.01±31.28Aa	2 509.01±37.77Bb	0.001
精氨酸 Arg	164.71±8.25	187.99±8.12	160.73±8.24	0.069
组氨酸 His	140.92±5.26a	147.03±4.39a	123.18±5.08b	0.010
异亮氨酸 Ile	149.27±4.59Bb	191.70±4.53Aa	164.32±8.43Bb	0.001
亮氨酸 Leu	245.8±9.44b	289.96±7.89a	259.81±9.63b	0.011
赖氨酸 Lys	279.17±9.48Cc	367.72±9.72Aa	306.47±7.62Bb	0.001
蛋氨酸 Met	149.65±6.06b	174.94±8.81a	147.75±7.27b	0.037
苯丙氨酸 Phe	260.23±7.89	280.99±5.65	260.52±6.68	0.077
苏氨酸 Thr	709.81±19.07Bb	900.73±18.65Aa	762.51±19.92Bb	0.001
色氨酸 Trp	71.18±2.26	76.61±3.97	68.31±2.87	0.194
缬氨酸 Val	220.01±8.14Bb	274.33±5.85Aa	255.4±9.76Aa	0.001
非必需氨基酸 NEAA	3 218.19±33.14Bb	3 648.09±53.56Aa	3 266.05±50.64Bb	0.001
丙氨酸 Ala	604.30±28.04b	716.82±20.46a	635.48±20.09b	0.010
天冬氨酸 Asp	42.26±1.73Cc	62.51±2.57Aa	50.13±1.98Bb	0.001
天冬酰胺 Asn	101.29±5.01	94.10±9.47	89.13±9.23	0.582
半胱氨酸 Cys	75.06±7.91	74.43±1.83	74.72±4.15	0.996
谷氨酰胺 Gln	372.29±14.87	386.31±16.47	361.6±10.68	0.485
谷氨酸 Glu	140.50±3.70	139.03±5.05	132.61±3.08	0.363
甘氨酸 Gly	690.36±13.13	726.71±16.99	690.13±16.12	0.192
脯氨酸 Pro	341.50±18.80b	409.08±17.53a	352.54±18.95b	0.044
丝氨酸 Ser	573.98±12.81Cc	720.46±14.45Aa	625.06±15.99Bb	0.001
酪氨酸 Tyr	276.65±18.55	318.64±17.29	254.66±16.13	0.056
总氨基酸 TAA	5 608.95±63.32Bb	6 540.10±81.92Aa	5 775.05±72.17Bb	0.001

禽机体脂代谢的主要指标,其中HDL可促进周围组织中CHO的释放,并将其转运至肝脏中进行分解,当HDL的含量降低时,将影响肝脏的脂代谢功能^[24]。研究表明,有机酸化剂可通过提高肝脏中脂肪酶的活性来改善肉鸡的脂代谢功能^[25]。本研究成果显示,饲料联合添加0.5%的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡血浆中HDL的含量,表明饲料联合添加0.5%的腐殖酸钠和酸化剂有助于改善肉鸡肝脏的脂代谢功能。这可能是有机酸化剂提高了肝脏中脂肪酶活性,加快了高密度脂蛋白-胆固醇(HDL-C)在肝脏中的分解,进而提高了血液HDL的浓度,改善机体肝脏脂代谢功能。

血浆中GLU的含量反映了畜禽肠道吸收GLU

进入血液的水平,这与畜禽肠道对饲料中碳水化合物的消化吸收有关^[26]。柠檬酸钙和乳酸钙属有机酸盐,在宿主胃环境中,柠檬酸钙和乳酸钙被分解为柠檬酸和乳酸,降低宿主胃肠道环境中的pH,提高胃蛋白酶、胰蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等活性,提高宿主对营养物质的吸收^[27]。也有研究表明,腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡对饲料中营养物质的表观消化率^[2,28]。本研究成果显示,饲料联合添加0.5%和1%的腐殖酸钠和酸化剂均显著提高肉鸡血浆中GLU的含量,这可能是因为饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂降低了肉鸡肠道中的pH,提高了胃肠道环境中消化酶的活性,进而促进了肉鸡肠道对饲料中营养物质的消化与吸收,提高了血浆中GLU的浓度。

3.2 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆抗氧化能力的影响

抗氧化能力是反映畜禽机体健康水平的重要指标之一, 畜禽机体的抗氧化能力与氧化自由基的清除率有关, 一般情况下, 畜禽机体内氧化自由基的产生和清除处于平衡状态。腐殖酸钠具有多种功能性基团, 具有较强的氧化还原能力, 可通过提高抗氧化酶活性和清除氧化自由基来提高动物机体的抗氧化能力^[29-31]。柠檬酸参与畜禽机体的三羧酸循环, 产生 ATP, 为机体提供能量, 从而提高氧化自由基的清除率, 增强抗氧化能力, 而乳酸钙可抑制脂质过氧化过程, 提高抗氧化能力^[32-33]。在本研究中, 饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡机体的 T-AOC, 并降低 MDA 的含量, 这也与试验前期的研究结果(联合添加腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡胸肌的抗氧化能力)一致^[19]。腐殖酸钠和酸化剂之所以提高肉鸡机体的抗氧化能力: 一是因为腐殖酸钠含有酚羟基和醌基等功能团, 醌基在电子传递过程中其重要作用, 可有效清除体内氧化自由基, 是腐殖酸钠起抗氧化作用的重要功能团; 二是因为柠檬酸和乳酸分别参加机体内的三羧酸循环和糖酵解途径, 为机体提供大量 ATP, 增强机体的清除氧化自由基的功能, 提高抗氧化能力^[19]。因此, 联合使用腐殖酸钠和酸化剂可以提高肉鸡机体的抗氧化能力。

3.3 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆免疫功能的影响

一般情况下, 畜禽机体内的免疫系统处于平衡状态, 当免疫系统失衡时, 炎症反应爆发, 炎症因子产生紊乱, 严重影响畜禽机体的健康水平^[32]。IL-22 是由激活的 T 细胞产生的细胞因子, 其介导的信号通路可增强周围组织细胞的免疫反应, 进而提高畜禽机体免疫力^[34]。免疫球蛋白是一类参与畜禽机体内体液免疫的球蛋白, 目前肉鸡机体内的球蛋白主要有 IgA、IgG 和 IgM^[35]。在本研究中, 饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡血浆中 IL-22、IgA 和 IgM 的含量, 表明联合添加腐殖酸钠和酸化剂在一定程度上可以增强黄羽肉鸡的免疫功能。试验前期研究结果发现, 饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂可提高肉鸡的免疫器官指数, 增强肉鸡机体的免疫功能, 这与本研究结果相呼应^[16]。也与 Akaichi 等^[12]的研究结果相似。Yu 等^[36]研究表明, 肠道菌群与宿主

免疫系统之间存在共生关系。Xu 等^[37]研究发现, 小鼠肠道乳酸菌丰度的增加与大鼠血清中的 IgA 和 IgG 含量呈正相关。目前, 已有研究表明, 腐殖酸钠和酸化剂之间具有协同作用; 饲料添加腐殖酸钠或酸化剂可降低肠道环境的 pH 值, 促进有益菌的生长与繁殖, 抑制致病菌的生长, 改善肠道菌群结构^[2,38-40]。因此, 饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂增强肉鸡机体的免疫功能, 可能与其改善肉鸡肠道的菌群结构有关。

3.4 联合添加腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡血浆游离氨基酸含量的影响

血浆中游离氨基酸含量受环境、营养和疾病等多种因素影响, 可直接参与畜禽机体内氨基酸代谢和蛋白质沉积, 反映畜禽机体的营养状况^[41]。在本研究中, 饲料联合添加腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡血浆中 EAA、NEAA 和 TAA 的含量。研究表明, 血浆游离氨基酸的含量受饲料蛋白水平和氨基酸平衡状况的影响; 而腐殖酸钠和酸化剂可显著提高肉鸡对饲料中营养物质的表观消化率^[2,27,42]。因此, 肉鸡血浆中 EAA、NEAA 和 TAA 的含量, 可能与腐殖酸钠和酸化剂提高肉鸡对饲料养分表观消化率有关。

游离氨基酸除了参与蛋白质和多肽的构成, 还具有调节和维持动物生长、繁殖、免疫和抗氧化等关键代谢途径的作用^[43]。其中, His 常以肌肽的形式发挥抗炎、抗氧化和维持机体 pH 稳定等作用^[44-45]。Leu、Ile 和 Val 被称为支链氨基酸(Branched chain amino acid, BCAA), 可通过 mTOR 信号通路促进蛋白质合成, 并抑制蛋白质降解; 通过调控活性氧(Reactive oxygen species, ROS)系统, 降低 ROS 的产生, 提高抗氧化能力; 还可作为信号因子调控糖代谢, 维持机体能量平衡^[46-48]。Lys、Met 和 Thr 是肉鸡饲料中的三大限制性氨基酸, 在蛋白质合成和免疫应答方面发挥重要作用^[49-51]。Ala 和 Asp 参与畜禽机体内的三羧酸循环和尿素循环, 为畜禽机体供能。Pro 可清除畜禽机体内的 ROS, 诱导氧化自由基凋亡, 特别是超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$), 还可作为信号因子调控畜禽机体的免疫系统^[43,52]。Ser 可为畜禽机体内的氧化还原平衡和还原生物合成提供吡啶核苷酸^[53]。在本研究中, 饲料联合添加 0.5% 的腐殖酸钠和酸化剂提高了肉鸡血浆中 His、Leu、Ile、Val、Lys、Met、Thr、Ala、Asp、Pro 和 Ser 的含量, 这表明联合使用腐殖酸钠和酸化剂可通过调控游离氨基酸的含量来改善肉鸡机体对

氨基酸的利用率,促进蛋白质沉积,增强抗氧化能力和免疫功能。这与0.5%组血浆中TP和GLU含量显著升高,UREA含量显著降低,抗氧化能力显著提高和免疫功能显著增强的结果相呼应。

4 结 论

综上,饲料联合添加一定比例的腐殖酸钠和酸化剂可有效改善黄羽肉鸡机体内的代谢水平,增强机体抗氧化能力和免疫功能,提高血浆游离氨基酸水平,且添加0.5%的效果优于1%。

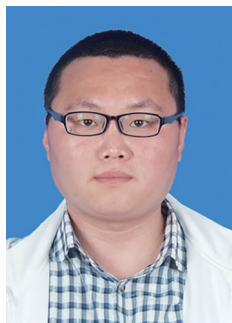
参考文献 References

- [1] 陈志敏,张海生,陈将,常文环,郑爱娟,蔡辉益,刘国华. 腐殖酸钠对肉仔鸡生长性能、免疫功能和抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(4): 1733-1742
- Chen Z M, Zhang H S, Chen J, Chang W H, Zheng A J, Cai H Y, Liu G H. Effects of sodium humate on growth performance, immune function and antioxidant capacity of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(4): 1733-1742 (in Chinese)
- [2] 李贞明,余苗,唐延天,李袁飞,刘志昌,容庭,马现永. 腐殖酸钠对白羽肉鸡营养物质表观消化率、粪便微生物及其代谢产物的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54(12): 5091-5100
- Li Z M, Yu M, Tang Y T, Li Y F, Liu Z C, Rong T, Ma X Y. Effects of sodium humate on nutrient apparent digestibility, fecal microorganisms and their metabolites in white-feathered broilers [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2023, 54(12): 5091-5100 (in Chinese)
- [3] Arif M, Alagawany M, Abd El-Hack M E, Saeed M, Arain M A, Elnesr S S. Humic acid as a feed additive in poultry diets: A review [J]. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 2019, 20(3): 167-172
- [4] 刘娜,安晓萍,张倩茹,王园,王瑞芳,齐景伟. 腐殖酸钠对植物乳杆菌生长、抑菌和黏附能力的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 115-119, 124
- Liu N, An X P, Zhang Q R, Wang Y, Wang R F, Qi J W. Effects of sodium humate on the growth, bacteriostasis and adhesion ability of *Lactobacillus plantarum* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(22): 115-119, 124 (in Chinese)
- [5] Brandts I, Balasch J C, Gonçalves A P, Martins M A, Pereira M L, Tvarijonaviciute A, Teles M, Oliveira M. Immuno-modulatory effects of nanoplastics and humic acids in the European seabass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125562
- [6] Conselvan G B, Pizzeghello D, Francioso O, Di Foggia M, Nardi S, Carletti P. Biostimulant activity of humic substances extracted from leonardites [J]. *Plant and Soil*, 2017, 420: 119-134
- [7] Khan S H, Iqbal J. Recent advances in the role of organic acids in poultry nutrition [J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2016, 44(1): 359-369
- [8] Pearlin B V, Muthuvel S, Govidasamy P, Villavan M, Alagawany M, Ragab Farag M, Dhama K, Gopi M. Role of acidifiers in livestock nutrition and health: A review [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2020, 104(2): 558-569
- [9] Palamidi I, Paraskeuas V, Theodorou G, Breitsma R, Schatzmayr G, Theodoropoulos G, Fegeros K, Mountzouris K C. Effects of dietary acidifier supplementation on broiler growth performance, digestive and immune function indices [J]. *Animal Production Science*, 2016, 57(2): 271-281
- [10] Gao C Q, Shi H Q, Xie W Y, Zhao L H, Zhang J Y, Ji C, Ma Q G. Dietary supplementation with acidifiers improves the growth performance, meat quality and intestinal health of broiler chickens [J]. *Animal Nutrition*, 2021, 7(3): 762-769
- [11] Akaichi A, Jebali A, Benlarbi M, Mahjoub T, Kaboudi K, Chaouacha Chekir R. Ben, Haouas Z, Boudhrioua N. Effects of humic acid and organic acids supplements on performance, meat quality, leukocyte count, and histopathological changes in spleen and liver of broiler chickens [J]. *Research in Veterinary Science*, 2022, 150: 179-188
- [12] Akaichi A, Jebali A, Abbes O, Taieb S. Haj, Feki M, Kaboudi K, Chaouacha Chekir R. Ben, Benlarbi M, Boudhrioua N. Effect of humic acid and organic acids, alone or in combination, on blood biochemical constituents and humoral immune response in broiler chickens [J]. *Livestock Science*, 2022, 258: 104880-
- [13] Aristimunha P C, Mallheiros R D, Ferket P R, Cardinal K M, Moreira Filho A L B, Santos E T, Cavalcante D T, Ribeiro A M L. Effect of dietary organic acids and humic substance supplementation on performance, immune response and gut morphology of broiler chickens [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2020, 29(1): 85-94
- [14] Edmonds M S, Johal S, Moreland S. Effect of supplemental humic and butyric acid on performance and mortality in broilers raised under various environmental conditions [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2014, 23(2): 260-267
- [15] 崔艺燕,田志梅,刘志昌,容庭,李贞明,余苗,马现永,叶秀峰. 纳米氧化锌对仔猪血液生化、抗氧化、免疫指标及游离氨基酸含量的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(8): 4988-4997
- Cui Y Y, Tian Z M, Liu Z C, Rong T, Li Z M, Yu M, Ma X Y, Ye X F. Effects of nano zinc oxide on blood biochemical, antioxidant and immune indexes and free amino acid contents in piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(8): 4988-4997 (in Chinese)
- [16] 宋妍妍,陈代文,余冰,何军,罗玉衡,毛湘冰,郑萍,罗钧秋,虞洁. 高剂量单宁酸对断奶仔猪血液学参数、脏器指数和组织病理学的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(4): 1899-1907
- Song Y Y, Chen D W, Yu B, He J, Luo Y H, Mao X B, Zheng P, Luo J Q, Yu J. Effects of high dose tannic acid on hematological parameters, organ indexes and histopathology of weaned piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(4): 1899-1907 (in Chinese)
- [17] Proskina L, Barzdina D, Valdovska A, Pilvere I, Vircava I, Cerina S, Meskis S. Assessment of the inclusion of a feed additive of sodium humate derived from freshwater sapropel in diets for broiler chickens [J]. *Veterinary World*, 2023, 16(10): 2029-2041
- [18] Khan R U, Naz S, Raziq F, Qudratullah Q, Khan N A, Laudadio V, Tufarelli V, Ragni M. Prospects of organic acids as safe alternative to antibiotics in broiler chickens diet [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(22): 32594-32604
- [19] 李贞明,余苗,刘志昌,崔艺燕,李袁飞,容庭,马现永. 联合使用腐殖酸钠和酸化剂对黄羽肉鸡生长性能和肉品质的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2023,

- 50(12):4908-4916
- Li Z M, Yu M, Liu Z C, Cui Y Y, Li Y F, Rong T, Ma X Y. Effect of combined use of sodium humate and acidifier on growth performance and meat quality of yellow feather broilers[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023, 50(12):4908-4916 (in Chinese)
- [20] 汪晶晶, 任红立, 董佳琦, 金三俊, 李彦芳, 武洪志, 刁新平. 微生物制剂和复合酸化剂对哺乳母猪生产性能、血清生化指标以及乳成分的影响[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(2):685-695
- Wang J J, Ren H L, Dong J Q, Jin S J, Li Y F, Wu H Z, Diao X P. Effects of probiotics and compound acidifier on performance, serum biochemical and immune indexes and milk composition of lactating sows[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(2):685-695 (in Chinese)
- [21] 王凯英, 鲍坤, 徐超, 刘晗璐, 刘学庆, 李光玉. 酸化剂对乌苏里貉生产性能及血清生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(12):3717-3722
- Wang K Y, Bao K, Xu C, Liu H L, Liu X Q, Li G Y. Effects of acidifier on performance and serum biochemical indices of racoon dogs [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(12):3717-3722 (in Chinese)
- [22] 张相鑫, 陈澄, 唐志如, 甄吉福, 许庆庆, 孙志洪. 饲料粗蛋白质水平对断奶仔猪肝脏氨基酸代谢酶活性及转运载体 mRNA 表达的影响[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(4):1431-1439
- Zhang X X, Chen C, Tang Z R, Zhen J F, Xu Q Q, Sun Z H. Effects of dietary crude protein level on activities of amino acid metabolic enzymes and mRNA expression of amino acid transporters in liver of weaned piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(4):1431-1439 (in Chinese)
- [23] 王铭洋, 胡颖, 黎明, 王述柏, 赵成新, 苗晋锋. 饮水型酸化剂对蛋鸡免疫功能及血清、肝脏和肾脏相关生化指标的影响[J]. *中国家禽*, 2021, 43(3):47-52
- Wang M Y, Hu Y, Li M, Wang S B, Zhao C X, Miao J F. Effects of acidifiers supplementation by drinking water on physiological and biochemical function of laying hens[J]. *China Poultry*. 2021, 43(3):47-52. (in Chinese)
- [24] Setyaningrum S, Siregar D J S, Warisman. The effect of herbal drink on the levels of high density lipoprotein and low density lipoprotein of broiler chicken [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021, 803(1): 012003
- [25] 韩婧, 马海田. 日粮中添加(-)-羟基柠檬酸对肉鸡脂肪代谢的影响[J]. *畜牧与兽医*, 2015, 47(5):20-25
- Han J, Ma H T. Effects of (-)-hydroxycitric acid on lipid metabolism in broiler chickens [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2015, 47(5):20-25 (in Chinese)
- [26] 陈凤鸣, 陈清华, 王雄, 丁增辉. 真菌产与细菌产木聚糖酶对黄羽肉鸡生长性能、小肠绒毛形态和血液生化指标影响的比较[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(7):2132-2139
- Chen F M, Chen Q H, Wang X, Ding Z H. Comparison of effects of xylanase production by fungus and bacteria on growth performance, small intestine morphology and some blood biochemical indices of yellow-feathered broilers[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(7):2132-2139 (in Chinese)
- [27] 尹苗, 陈希文, 王聪, 伍春平, 何健. 酸化剂的作用机制及在畜禽健康养殖中的应用[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(20):31-35
- Yin M, Chen X W, Wang C, Wu C P, He J. Action mechanism of acidifier and its application in healthy livestock and poultry breeding[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(20):31-35 (in Chinese)
- [28] Šamudovská A, Demeterová M. Effect of diet supplemented with natural humic compounds and sodium humate on performance and selected metabolic variables in broiler chickens[J]. *Acta Veterinaria Brno*, 2010, 79(3):385-393
- [29] 鲁鑫涛, 邱家凌, 祝家明, 周琴, 刘兵, 余东游. 腐植酸对蛋鸡产蛋后期产蛋性能、抗氧化及促产蛋激素分泌的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2020, 56(1):122-127
- Lu X T, Qiu J L, Zhu J M, Zhou Q, Liu B, Yu D Y. Effects of dietary humic acids supplementation on laying performance, antioxidant capacity and serum gonadotropin levels of hens during late laying period [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2020, 56(1):122-127 (in Chinese)
- [30] Vašková J, Veliká B, Pilátová M, Kron I, Vaško L. Effects of humic acids *in vitro* [J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal*, 2011, 47(5/6):376-382
- [31] Wang D, You Z D, Du Y Y, Zheng D, Jia H T, Liu Y. Influence of sodium humate on the growth performance, diarrhea incidence, blood parameters, and fecal microflora of pre-weaned dairy calves[J]. *Animals (Basel)*, 2022, 12(1):123
- [32] 杨国峰, 狄斌, 贺佳仪, 王长康, 甘乾福, 高玉云. 复合酸化剂对伊拉兔生长性能、免疫和抗氧化功能以及空肠形态的影响[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(12):8029-8037
- Yang G F, Di B, He J Y, Wang C K, Gan Q F, Gao Y Y. Effects of compound acidifiers on growth performance, immune and antioxidant function and jejunum morphology of ira rabbits [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(12):8029-8037 (in Chinese)
- [33] Kim Y H, Keeton J T, Smith S B, Maxim J E, Yang H S, Savell J W. Evaluation of antioxidant capacity and colour stability of calcium lactate enhancement on fresh beef under highly oxidising conditions [J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(1):272-278
- [34] Markota A, Endres S, Kobold S. Targeting interleukin-22 for cancer therapy [J]. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 2018, 14(8):2012-2015
- [35] 赵莉, 秦亮, 吴仙花, 李博宁, 马宁, 许迟. 日粮中添加酶联微生态制剂、酸化剂对肉鸡生长性能及免疫功能的影响[J]. *饲料研究*, 2021, 44(9):63-65
- Zhao L, Qin L, Wu X H, Li B N, Ma N, Xu C. Effect of enzyme-linked microecological preparations and compound acidifier on growth performance and immune function of Yellow-feathered chicken [J]. *Feed Research*, 2021, 44(9):63-65 (in Chinese)
- [36] Yu Q, Jia A N, Li Y, Bi Y J, Liu G W. Microbiota regulate the development and function of the immune cells [J]. *International Reviews of Immunology*, 2018, 37(2):79-89
- [37] Xu Y Y, Xie L Y, Zhang Z Y, Zhang W W, Tang J, He X L, Zhou J, Peng W H. *Tremella fuciformis* polysaccharides inhibited colonic inflammation in dextran sulfate sodium-treated mice via Foxp3+ T cells, gut microbiota, and bacterial metabolites [J]. *Frontiers in Immunology*, 2021, 12:648162
- [38] Edmonds M S, Johal S, Moreland S. Effect of supplemental humic and butyric acid on performance and mortality in broilers raised under various environmental conditions [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2014, 23(2):260-267
- [39] 刘新泽, 胡友军, 赵晓南, 张瑞阳, 朱宇旌, 张勇, 李方方. 饲料中添加不同组

- 合的酸化剂对肉鸡肠道微生物菌群、肠道形态以及胃蛋白酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(6): 3559-3569
- Liu X Z, Hu Y J, Zhao X N, Zhang R Y, Zhu Y J, Zhang Y, Li F F. Effects of dietary different combinations of acidifiers on intestinal microbial flora, intestinal morphology and pepsin activity of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(6): 3559-3569 (in Chinese)
- [40] Wu Y Q, Yin X N, Wang Y L, Mahmood T, Shahid M, Yin D F, Yuan J M. Effect of 2-hydroxy-4-(methylthio) butanoic acid and acidifier on the performance, chyme pH, and microbiota of broilers [J]. *Animal Science Journal*, 2020, 91(1): e13409
- [41] Morales A, Cota S E M, Ibarra N O, Arce N, Htoo J K, Cervantes M. Effect of heat stress on the serum concentrations of free amino acids and some of their metabolites in growing pigs [J]. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(7): 2835-2842
- [42] 余苗, 李贞明, 陈卫东, 容庭, 王刚, 马现永. 黑水虻幼虫粉对育肥猪营养物质消化率、血清生化指标和氨基酸组成的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(7): 3330-3337
- Yu M, Li Z M, Chen W D, Rong T, Wang G, Ma X Y. Effects of *Hermetia illucens* L. larvae meal on nutrient digestibility, serum biochemical indices and amino acid composition of finishing pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(7): 3330-3337 (in Chinese)
- [43] Wu G Y. Amino acids: Metabolism, functions, and nutrition [J]. *Amino Acids*, 2009, 37(1): 1-17
- [44] Guiotto A, Calderan A, Ruzza P, Borin G. Carnosine and carnosine-related antioxidants: A review [J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2005, 12(20): 2293-2315
- [45] 胡孟, 武书庚, 王晶, 齐广海, 张海军. 组氨酸的生理功能及在动物生产中的应用[J]. 中国饲料, 2018(7): 38-45
- Hu M, Wu S G, Wang J, Qi G H, Zhang H J. Physiological function and application of histidine in animal production [J]. *China Feed*, 2018(7): 38-45 (in Chinese)
- [46] Arriola Apelo S I, Singer L M, Lin X Y, McGilliard M L, St-Pierre N R, Hanigan M D. Isoleucine, leucine, methionine, and threonine effects on mammalian target of rapamycin signaling in mammary tissue [J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(2): 1047-1056
- [47] Kim W K, Singh A K, Wang J Q, Applegate T. Functional role of branched chain amino acids in poultry: a review [J]. *Poultry Science*, 2022, 101(5): 101715
- [48] 武赛男, 刘喜泽, 甄玉国, 孙喆, 张学峰, 王涛. 支链氨基酸的特点及生物学作用研究进展[J]. 经济动物学报, 2023, 27(2): 151-156
- Wu S N, Liu X Z, Zhen Y G, Sun Z, Zhang X F, Wang T. Advance of research on the characteristics and biological functions of branched chain amino acids [J]. *Journal of Economic Animal*, 2023, 27(2): 151-156 (in Chinese)
- [49] 李俊霖, 郭传庄, 王松江, 王建彬, 隋松森. 赖氨酸的生物学功能及其在饲料中的应用[J]. 中国饲料, 2020(21): 63-66
- Li J L, Guo C Z, Wang S J, Wang J B, Sui S S. Research advance on biological activities and application of lysine [J]. *China Feed*, 2020(21): 63-66 (in Chinese)
- [50] 吴炎, 赵伟刚, 郭肖兰, 杨乾龙, 鲍坤, 王晓旭, 朱勇臻, 王凯英. 蛋氨酸的代谢途径及其对反刍动物机体健康和生产的调控研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(10): 53-60
- Wu Y, Zhao W G, Guo X L, Yang Q L, Bao K, Wang X X, Zhu Y Z, Wang K Y. Research progress of methionine metabolism pathway and mechanism of regulating ruminant health and production [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(10): 53-60 (in Chinese)
- [51] 伏春燕, 王文彬, 李霞, 阎佩佩, 董以雷, 燕磊, 黄河, 朱应波, 魏祥法, 石天虹, 刘雪兰. 饲料苏氨酸水平对肉鸡生长性能、血清生化指标、免疫器官指数及小肠形态发育的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(7): 4249-4260
- Fu C Y, Wang W B, Li X, Yan P P, Dong Y L, Yan L, Huang H, Zhu Y B, Wei X F, Shi T H, Liu X L. Effects of dietary threonine levels on growth performance, serum biochemical indices, immune organ indexes and intestinal morphological development of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(7): 4249-4260 (in Chinese)
- [52] 陈秋萍, 徐生祥, 刘庆友, 石德顺. 脯氨酸对母猪繁殖性能影响的研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2017, 44(3): 767-772
- Chen Q P, Xu S X, Liu Q Y, Shi D S. Research progress on effects of proline on reproductive performance of sows [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2017, 44(3): 767-772 (in Chinese)
- [53] Parker S J, Metallo C M. Chasing one-carbon units to understand the role of serine in epigenetics [J]. *Molecular Cell*, 2016, 61(2): 185-186

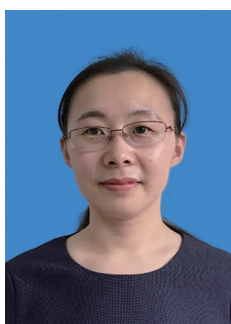
责任编辑: 秦梅



第一作者简介: 李贞明, 硕士, 主要从事生态健康养殖和动物营养与饲料等相关研究。曾获广东省农业技术推广奖一等奖、二等奖、产学研合作创新成果奖二等奖、第十一届中国技术市场协会金桥奖项目奖等奖项共5项; 授权实用新型专利3件, 软件著作权1件; 发表论文10余篇, 参编专著2部; 参与省部级和市级项目26项。



通讯作者简介：容庭,农学硕士,副研究员。主要从事畜禽无抗养殖与饲养环境改善技术研究。任职期间,近五年主持或承担省市厅级科技计划项目 10 余项,参与项目 30 余项;获得农科院科学技术一等奖、省农业技术推广二等奖、一等奖各 1 项及三等奖 2 项、软件著作权 6 项及主推技术 3 项;以第一作者或共同通讯作者发表 15 篇,获得优秀论文奖 5 篇;获得省市主推技术 4 项,发明专利 5 项及实用新型专利 30 余项。



通讯作者简介：宋慧敏,硕士,助理研究员。主要从事农业资源与环境经济评价及研究工作。主持或参与的项目共 13 项,其中软科学项目 7 项;发表论文共 10 余篇,其中《供给侧结构性改革背景下广东深化农业结构调整的基本思路和重点任务》于 2017 年 8 月被广东省人民政府发展研究中心编著的《广东发展蓝皮书 2017》采纳;授权实用新型专利 1 件,并转化;获得软件著作权 4 件,其中 2 件获得应用;主持或以主要参与人参与制(修)订的发展规划、条例、办法、实施方案 6 个,均已实施应用;获得省级荣誉 1 项,市厅级奖励 16 项。