

发酵黄芪对鹅生产性能、血清免疫指标和消化功能的影响

曹婷婷¹, 黄榆智², 黄禹璐², 杜嘉¹, 苏少峰³, 何航¹, 李龙娇¹, 黄定飞¹, 章杰^{2*}, 郝永峰^{1*}

(1. 重庆三峡职业学院动物科技学院, 重庆 404155; 2. 西南大学动物科学技术学院, 重庆 402460;

3. 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古呼和浩特 010031)

摘要: 本试验旨在探讨不同水平发酵黄芪对鹅生产性能、血清免疫指标和消化功能的影响。选取 28 日龄遗传背景一致、体重 (894.61 ± 67.40) g 的四川白鹅 240 只, 随机分成 4 组, 每组 6 个重复, 每个重复 10 只 (公母各半), 分别饲喂添加 0% (对照组)、0.2%、0.5%、0.8% 发酵黄芪的饲料。试验期 42 d。结果显示: 与对照组相比, 0.2% 组和 0.5% 组鹅平均日增重提高 ($P < 0.05$); 体尺指标中颈长、龙骨长随添加量线性增长 ($P < 0.05$), 0.8% 组龙骨长和全净膛率高于其他各组 ($P < 0.05$); 0.5% 组血清溶菌酶水平高于其他各组 ($P < 0.05$), 各添加组谷丙转氨酶和谷草转氨酶水平均低于对照组 ($P < 0.05$); 0.2% 组回肠相对长度、胃蛋白酶和胰蛋白酶水平高于对照组 ($P < 0.05$), 各添加组磷和总能的表观消化率均高于对照组 ($P < 0.05$); 随着发酵黄芪添加量的升高, 平均日增重与平均日采食量呈二次增长趋势 ($P < 0.05$), 而腹脂率则呈二次下降趋势 ($P < 0.05$), 血清免疫球蛋白 A (IgA)、免疫球蛋白 M (IgM) 水平以及淀粉酶、脂肪酶、 β -葡萄糖醛酸苷酶活性呈线性增长趋势 ($P < 0.05$)。本试验条件下, 添加 0.5% 发酵黄芪可显著提高鹅免疫性能, 还可改善生产性能和消化功能。

关键词: 发酵黄芪; 生产性能; 免疫性能; 消化性能; 鹅

中图分类号: S835.5

文献标识码: A

DOI 编号: 10.19556/j.0258-7033.20250603-06

黄芪是常用的中草药, 富含三萜皂苷类化合物、多糖和黄酮类化合物等活性成分^[1], 具有保护心脑血管^[2]、免疫调节^[3]、抗炎^[4]和抗衰老^[5]等作用。目前, 黄芪在畜禽生产上已被广泛应用。Song 等^[6]研究发现, 添加黄芪可显著提高宁都黄鸡平均日增重和胸肌率, 同时显著降低耗料增重比。Alagawany 等^[7]试验表明, 添加黄芪可显著提高鹌鹑血清免疫球蛋白 G (IgG) 和免疫球蛋白 M (IgM) 水平, 而显著降低总胆固醇和甘油

三酯水平。直接饲喂黄芪可能因其含有黄芪甲苷等营养成分而产生负面影响, 但发酵处理可有效降低其毒性并破坏细胞结构释放活性成分, 提高养分利用率^[8]。研究表明, 与未发酵黄芪相比, 发酵黄芪可显著提高肉鸡平均日增重, 改善耗料增重比并增加有益菌丰度, 在提高家禽生产性能、优化肠道菌群结构、增强免疫和抗氧化能力方面更具优势^[9]; 同时, 发酵黄芪可显著降低蛋鸡的料蛋比, 提高产蛋率和蛋品质, 并显著改善肝脏健康水平^[10]。此外, Guo 等^[11]和隋明等^[12]关于肉鸡和肉鸭的研究也显示, 相较于未发酵黄芪, 发酵黄芪显著改善平均日增重等生产性能。

本团队前期已利用植物乳杆菌成功制备褐色粉状的发酵黄芪产品, 并证明其可显著提高断奶驴驹有机物和蛋白质的表观消化率, 以及血清免疫球蛋白 A (IgA) 和 IgM 水平^[13]。鉴于家禽与哺乳动物在消化生理和免疫调控上的差异, 本研究旨在探讨发酵黄芪对鹅生产性能、免疫和消化功能的影响, 为发酵黄芪在鹅生产中的应用提供理论支持。

收稿日期: 2025-06-03; 修回日期: 2025-08-14

资助项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN2023 03503、KJQN202303511、KJQN202203501、KJQN202203 510)

作者简介: 曹婷婷 (1990-), 女, 重庆万州人, 硕士, 讲师, 主要从事动物健康养殖研究, E-mail: 269300473@qq.com; 黄榆智 (2001-) 男, 壮族, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事动物健康养殖研究, E-mail: 1933838003@qq.com

* 通信作者: 章杰 (1985-), 男, 四川雅安人, 博士, 副教授, 主要从事动物健康养殖研究, E-mail: zhangjie813@163.com;

郝永峰 (1989-), 男, 山西忻州人, 硕士, 讲师, 主要从事动物疫病防控和免疫研究, E-mail: 1148764878@qq.com

1 材料与方法

1.1 发酵黄芪制备 植物乳杆菌 (*Lactobacillus Plantarum* Luo, CCTCC M20221483, 由内蒙古自治区牧业科学院生物技术研究中心实验室筛选并保藏) 在 37℃ 条件下静置培养 24 h, 接种于 MRS 液体培养基, 生长至 1×10^9 CFU/mL 作为发酵液备用。黄芪 (北京知行本草农业科技开发有限公司) 经粉碎后过 80 目筛, 按照料液比 2:1 进行混匀, 分装于规格为 28 cm×35 cm 的发酵袋中, 排尽袋内空气后进行热压密封 (厌氧条件), 在温度 37℃ 条件下发酵 30 d。如表 1 所示, 黄芪经发酵后多种生物活性成分含量均提高 ($P<0.05$)。

表 1 黄芪发酵前后活性成分变化情况 mg/kg			
项目	发酵前	发酵后	P 值
黄酮	0.35±0.01	0.89±0.01	0.004
多酚	5.25±0.18	8.16±0.19	<0.001
多糖	19.86±0.81	57.07±1.39	<0.001
乙酸	0.62±0.06	1.00±0.07	0.003
乳酸	8.23±0.19	13.05±0.49	<0.001

1.2 试验设计及饲养管理 选取 28 日龄遗传背景一致、体重 (894.61±67.40) g、健康的四川白鹅 240 只, 随机分成 4 组, 每组 6 个重复, 每个重复 10 只 (公母各半)。对照组饲喂基础饲料, 试验组分别饲喂添加 0.2%、0.5%、0.8% 发酵黄芪的饲料。基础饲料参照 NRC (1994) 鹅的营养需要配制, 其组成和营养成分见表 2。采用网上平养, 自由采食和饮水, 常规免疫程序; 试验为期 42 d。

1.3 代谢试验 64 日龄时, 采用全收粪法, 具体操作方法参考文献^[14]。从每个重复中选择 1 只 (共 24 只) 接近该重复平均体重、健康的鹅移至代谢笼预饲 3 d 后, 在自由采食条件下连续记录 3 d 的采食量并收集全部排泄物, 清除其中的羽毛等杂物后称重, 65℃ 烘干 48 h, 自然回潮 24 h 后称重, 粉碎过 40 目筛备用, 用于测定表观消化率。

1.4 样品采集 试验第 42 天 (70 日龄), 所有鹅禁食 12 h (自由饮水) 后进行活体称重及体尺测量。随后, 每个重复随机选取 4 只接近平均体重的健康鹅, 颈静脉穿刺采集血液 10 mL 至肝素钠抗凝真空管, 置于 4℃ 环境 2 h, 以 3500 r/min 离心 10 min, 吸取血清分装于 1.5 mL 离心管, -20℃ 保存。采血后, 颈动脉放血屠宰, 测定屠宰性能, 并迅速采集心脏、肝脏、脾脏、肌胃、腺胃, 剔除脂肪及结缔组织后称重; 分离十二指肠、

表 2 基础饲料组成及营养成分 (风干基础)	
项目	含量
原料组成, %	
玉米	53.60
豆粕 (粗蛋白质 43%)	14.50
麦麸	11.50
米糠	13.40
蚕蛹 (粗蛋白质 60%)	1.79
氯化钠	0.20
磷酸氢钙	0.90
石粉	0.75
L- 赖氨酸 (98%)	0.18
DL- 蛋氨酸 (98%)	0.06
氯化胆碱 (50%)	0.12
预混料 ^①	2.00
砂砾	1.00
合计	100.00
营养成分 ^②	
代谢能, MJ/kg	11.21
粗蛋白质, %	14.81
粗纤维, %	8.04
总钙, %	0.80
总磷, %	0.40
赖氨酸, %	0.85
蛋氨酸, %	0.30

注: ①预混料为每千克饲料提供: 维生素 A 2 000 IU, 维生素 D₃ 2 000 IU, 维生素 E 60 mg, 维生素 K₃ 2 mg, 维生素 B₁ 4 mg, 维生素 B₂ 24 mg, 维生素 B₆ 4 mg, 维生素 B₁₂ 50 μg, 烟酸 12 mg, D- 泛酸 36 mg, 叶酸 4 mg, 生物素 0.4 mg, 铁 120 mg, 铜 4 mg, 锰 300 mg, 锌 160 mg, 碘 0.2 mg, 硒 0.2 mg; ②代谢能为计算值, 参照《中国饲料成分及营养价值表 (2023 年第 34 版)》进行计算, 粗蛋白质、粗纤维、总钙、总磷、赖氨酸和蛋氨酸为实测值。

空肠、回肠并测定长度及重量; 取腺胃和肝脏组织样本, 用预冷生理盐水冲洗后滤纸吸干, 液氮速冻后转移至 -80℃ 保存。

1.5 测定指标

1.5.1 生长性能 分别于试验第 1 天 (28 日龄) 和第 42 天 (70 日龄), 以重复为单位称量空腹体重, 记录为初始体重和末体重。试验期内每日饲喂 3 次 (07:00、12:00、18:00), 记录各重复供料量和剩料量, 计算平均日增重、平均日采食量和耗料增重比。

1.5.2 体尺 参照《家禽生产性能名词术语和度量计算方法》(NY/T823—2020), 对 70 日龄所有鹅进行体尺测量, 包括体斜长、胸宽、胸深、胸围、胸骨长、胫长、腕宽、胸角、颈长和颈围。

1.5.3 屠宰性能 参照《家禽生产性能名词术语和度量

计算方法》(NY/T823—2020)测定屠宰性能,计算屠宰率、半净膛率、全净膛率、胸肌率和腿肌率。

1.5.4 器官指数 取心、肝、脾、肌胃、腺胃、十二指肠、空肠和回肠称重并记录各肠段长度。计算公式:

器官指数=[器官重(g)/活体重(g)]×100%

肠道相对长度=各肠段长度(cm)/宰前活重(kg)

1.5.5 血清指标 使用全自动生化分析仪(BS-2000,迈瑞)测定血清谷丙转氨酶、谷草转氨酶、碱性磷酸酶、总蛋白、白蛋白、球蛋白、尿酸、总胆固醇、甘油三酯、高密度脂蛋白和低密度脂蛋白水平,并计算谷草/谷丙和白蛋白/球蛋白(白球比)比值;溶菌酶活性采用比浊法测定(A050-1-1,南京建成生物工程研究所);IgA、IgG 和 IgM 水平采用单克隆抗体免疫比浊法测定(E027-1-1、E026-1-1、E025-1-1,南京建成生物工程研究所)。

1.5.6 表观消化率 饲料及排泄物中粗蛋白质、钙、磷、总能分别采用《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)、《饲料中总磷的测定 分光光度法》(GB/T 6437—2018)、氧弹燃烧法(IKAC2000 全自动氧弹测定仪)测定。按全收粪法计算表观消化率:

饲料中某营养物质的表观消化率=[(饲料中该营养物质含量×采食量-粪样中该营养物质含量×排粪量)/(饲料中该营养物质含量×采食量)]×100%

1.5.7 消化酶 根据试剂盒(南京建成生物工程研究所)操作说明测定胃蛋白酶和β-葡萄糖醛酸苷酶水平,以及血清α-淀粉酶、胰蛋白酶和脂肪酶水平。

1.6 统计分析 利用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析及多重比较分析,并利用线性(L)和二次(Q)回归方程拟合发酵黄芪添加量的影响,P<0.05 表示差异显著。

2 结果

2.1 不同水平发酵黄芪对四川白鹅生长性能的影响 由

表 3 不同水平发酵黄芪对四川白鹅生长性能的影响 (n=6)

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
初体重 .g	911.06	870.14	901.73	895.48	6.15	0.11	0.59	0.13
末体重 .g	2985.91	3196.71	3198.99	3055.52	49.13	0.25	0.01	<0.01
平均日增重 .g	49.40 ^b	55.39 ^a	54.69 ^a	51.43 ^{ab}	0.92	0.03	0.53	0.01
平均日采食量 .g	170.34 ^b	205.66 ^a	196.42 ^a	193.54 ^a	4.70	0.02	0.16	0.02
耗料增重比	3.44	3.71	3.60	3.76	0.06	0.33	0.15	0.35

注:同行数据肩标字母相异表示差异显著 (P<0.05), 含相同字母或无字母表示差异不显著 (P>0.05)。下表同。

表 3 可知,与对照组相比,添加不同水平发酵黄芪可提高四川白鹅平均日采食量 (P<0.05), 0.2% 组和 0.5% 组平均日增重均提高 (P<0.05)。此外,随着发酵黄芪添加量的增加,末体重 (P_L=0.01; P_Q<0.01)、平均日增重 (P_Q=0.01) 和平均日采食量 (P_Q=0.02) 均增加。

2.2 不同水平发酵黄芪对四川白鹅体尺的影响 由表 4 可知,与对照组相比,添加 0.5% 和 0.8% 发酵黄芪提高了四川白鹅颈长和半潜水长 (P<0.05), 且 0.8% 组龙骨长提高 (P<0.05), 而添加不同水平的发酵黄芪均降低了胫长 (P<0.05); 0.8% 组半潜水长和龙骨长均高于 0.2% 组 (P<0.05)。随着发酵黄芪添加量的增加,颈长 (P_L=0.01; P_Q=0.01)、半潜水长 (P_L<0.01; P_Q=0.01) 和龙骨长 (P_L=0.01; P_Q=0.02) 均增加,而胫长 (P_L=0.04; P_Q<0.01) 则降低。

2.3 不同水平发酵黄芪对四川白鹅屠宰性能的影响 由表 5 所示,与对照组相比,添加不同水平的发酵黄芪均可提高腿肌率和半净膛率 (P<0.05), 0.5% 组和 0.8% 组胸肌率、0.8% 组全净膛率均提高 (P<0.05); 与对照组相比,添加不同水平的发酵黄芪均可降低腹脂率 (P<0.05), 0.2% 组和 0.5% 组也低于 0.8% 组 (P<0.05)。随着发酵黄芪添加量的增加,胸肌率 (P_L<0.01; P_Q<0.01)、腿肌率 (P_L=0.01; P_Q<0.01)、半净膛率 (P_L<0.01; P_Q<0.01) 和全净膛率 (P_L<0.01; P_Q=0.02) 均提高,而腹脂率 (P_Q<0.01) 则降低。

2.4 不同水平发酵黄芪对四川白鹅器官指数的影响 如表 6 所示,与对照组相比,添加 0.2% 和 0.5% 发酵黄芪可提高空肠相对长度 (P<0.05), 0.2% 组回肠相对长度也提高 (P<0.05)。0.2% 组空肠和回肠相对显著高于 0.8% 组 (P<0.05)。此外,随着发酵黄芪添加量的增加,空肠 (P_Q=0.01) 和回肠 (P_Q=0.01) 的相对长度均增加。

2.5 不同水平发酵黄芪对四川白鹅血清生化指标的影响 如表 7 所示,与对照组相比,添加不同水平的发

表 4 不同水平发酵黄芪对四川白鹅体尺的影响 (n=24)

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
体斜长 ,cm	29.11	29.75	30.27	28.98	0.47	0.77	0.97	0.61
颈长 ,cm	20.70 ^b	22.55 ^{ab}	23.90 ^a	23.25 ^a	0.40	0.02	0.01	0.01
胸围 ,mm	37.95	36.30	36.12	38.40	0.44	0.17	0.78	0.08
半潜水长 ,cm	67.00 ^c	68.40 ^{bc}	72.08 ^{ab}	73.37 ^a	0.84	0.01	<0.01	0.01
龙骨长 ,cm	15.30 ^{bc}	14.62 ^c	16.21 ^{ab}	16.53 ^a	0.24	0.01	0.01	0.02
胫围 ,mm	4.84	5.37	5.17	5.38	0.08	0.06	0.05	0.10
腕骨宽 ,mm	60.88	63.70	64.52	59.83	0.90	0.21	0.80	0.11
胸深 ,mm	86.30	89.72	92.40	91.58	1.33	0.39	0.12	0.23
胸宽 ,cm	110.62	106.02	113.52	110.38	1.25	0.21	0.56	0.81
胫长 ,mm	103.98 ^a	93.88 ^b	96.03 ^b	96.65 ^b	1.10	0.002	0.04	<0.01
胸角 ,°	101°20'	102°50'	106°28'	101°35'	0.91	0.17	0.66	0.19

表 5 不同水平发酵黄芪对四川白鹅屠宰性能的影响 (n=24) %

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
屠宰率	93.01	93.09	93.18	93.52	0.28	0.93	0.53	0.81
胸肌率	6.56 ^c	7.25 ^{bc}	7.72 ^{ab}	8.29 ^a	0.20	0.01	<0.01	<0.01
腿肌率	8.77 ^b	9.91 ^a	10.76 ^a	10.25 ^a	0.25	<0.01	0.01	<0.01
腹脂率	2.42 ^a	1.58 ^c	1.64 ^c	2.06 ^b	0.43	<0.01	0.21	<0.01
半净膛率	82.59 ^b	85.58 ^a	86.27 ^a	85.89 ^a	0.41	<0.01	<0.01	<0.01
全净膛率	74.47 ^b	75.76 ^{ab}	76.04 ^{ab}	78.27 ^a	0.48	0.03	<0.01	0.02

表 6 不同水平发酵黄芪对四川白鹅器官指数的影响 (n=24)

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
相对重量 ,%								
心脏	0.67	0.71	0.75	0.65	0.02	0.18	0.89	0.13
肝	1.93	1.72	1.83	1.64	0.04	0.09	0.05	0.13
脾	0.13	0.10	0.09	0.10	0.01	0.24	0.14	0.12
腺胃	0.43	0.37	0.39	0.33	0.08	0.12	0.55	0.80
肌胃	2.50	2.57	2.64	2.62	0.01	0.93	0.04	0.12
十二指肠	0.31	0.28	0.29	0.28	0.01	0.74	0.37	0.65
空肠	0.65	0.67	0.62	0.63	0.02	0.87	0.61	0.88
回肠	0.49	0.45	0.42	0.43	0.02	0.42	0.15	0.26
相对长度 ,cm/kg								
十二指肠	10.48	10.56	10.22	9.18	0.26	0.21	0.07	0.10
空肠	19.67 ^c	24.43 ^a	23.04 ^{ab}	21.16 ^{bc}	0.61	0.02	0.58	0.01
回肠	15.90 ^b	20.05 ^a	18.55 ^{ab}	16.69 ^b	0.54	0.02	0.86	0.01

酵黄芪均降低了血清中谷丙转氨酶和谷草转氨酶水平 ($P<0.05$)。0.5% 组白球比低于 0.2% 组 ($P<0.05$)。随着发酵黄芪添加量的增加,血清谷草 / 谷丙 ($P_Q<0.01$) 和高密度脂蛋白 ($P_L=0.02$) 水平均提高,而谷丙转氨酶 ($P_L=0.01$; $P_Q=0.04$)、谷草转氨酶 ($P_L=0.02$; $P_Q=0.01$)、碱性磷酸酶 ($P_L=0.03$) 和甘油三酯 ($P_L=0.03$; $P_Q=0.01$) 水平均降低。

2.6 不同水平发酵黄芪对四川白鹅免疫性能的影响 由表 8 可知,与对照组相比,饲料中添加不同水平发酵黄芪可提高血清中溶菌酶水平 ($P<0.05$),且 0.5% 组

表 7 不同水平发酵黄芪对四川白鹅血清生化指标的影响 (n=24)

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
谷丙转氨酶, U/L	22.33 ^a	11.33 ^{bc}	15.33 ^b	7.33 ^c	1.95	0.01	0.01	0.04
谷草转氨酶, U/L	68.00 ^a	38.33 ^b	41.00 ^b	38.33 ^b	4.47	0.02	0.02	0.01
碱性磷酸酶, U/L	898.67	702.67	708.67	635.33	1.45	0.12	0.03	0.07
谷草 / 谷丙	3.45 ^b	3.08 ^b	2.76 ^b	5.25 ^a	0.31	<0.01	0.06	<0.01
总蛋白, g/L	47.20	43.30	51.50	46.33	0.13	0.49	0.74	0.94
白蛋白, g/L	12.10	12.07	12.73	12.30	0.36	0.93	0.71	0.91
球蛋白, g/L	35.10	31.23	38.77	34.03	1.45	0.37	0.76	0.95
白球比	0.34 ^{ab}	0.39 ^a	0.33 ^b	0.36 ^{ab}	0.15	0.01	0.08	0.19
尿酸, μmol/L	238.33	296.00	237.33	227.00	10.57	0.05	0.35	0.17
总胆固醇, mmol/L	4.59	4.03	5.04	5.20	0.24	0.28	0.97	0.22
甘油三酯, mmol/L	0.99	1.25	0.59	1.08	0.12	0.16	0.03	0.01
高密度脂蛋白, mmol/L	2.62	2.62	3.07	3.26	0.12	0.11	0.02	0.06
低密度脂蛋白, mmol/L	1.73	1.54	1.66	1.71	0.07	0.82	0.95	0.74

表 8 不同水平发酵黄芪对四川白鹅免疫性能的影响 (n=24)

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
IgA, g/L	0.23 ^b	0.30 ^b	0.46 ^a	0.54 ^a	0.03	<0.01	<0.01	<0.01
IgG, g/L	12.45	12.51	11.45	11.59	0.27	0.37	0.12	0.20
IgM, g/L	0.04	0.04	0.04	0.05	0.002	0.06	0.02	0.08
溶菌酶, U/mL	519.09 ^c	670.27 ^b	862.39 ^a	641.29 ^b	0.08	<0.01	0.06	<0.01

表 9 不同水平发酵黄芪对四川白鹅消化酶活性的影响 (n=24)

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
淀粉酶, U/mg	32.91 ^c	36.56 ^b	37.13 ^b	40.90 ^a	0.77	<0.01	0.03	0.09
胃蛋白酶, U/mg	1.12 ^b	3.56 ^a	1.07 ^b	1.02 ^b	0.23	<0.01	0.43	0.14
胰蛋白酶, U/mL	2.93 ^b	6.18 ^a	2.20 ^b	2.53 ^b	0.52	0.01	0.20	0.22
脂肪酶, U/mL	327.47 ^b	522.80 ^a	557.27 ^a	586.00 ^a	24.37	<0.01	0.01	0.01
β- 葡萄糖醛酸苷酶, U/mg	0.015 ^b	0.019 ^a	0.021 ^a	0.021 ^a	0.001	0.03	<0.01	<0.01

高于 0.2% 组和 0.8% 组 ($P<0.05$)。0.5% 组和 0.8% 组血清 IgA 水平高于对照组和 0.2% 组 ($P<0.05$)。随着发酵黄芪添加量的增加, 血清 IgA ($P_L<0.01$; $P_Q<0.01$)、IgM ($P_L=0.02$) 和溶菌酶 ($P_Q<0.01$) 水平均提高。

2.7 不同水平发酵黄芪对四川白鹅消化酶活性的影响
由表 9 所示, 与对照组相比, 添加不同水平发酵黄芪提高了腺胃和肝脏中淀粉酶、脂肪酶和 β- 葡萄糖醛酸苷酶水平 ($P<0.05$), 且 0.2% 组胃蛋白酶和胰蛋白酶水平平均提高 ($P<0.05$)。0.8% 组淀粉酶水平高于 0.2% 组和 0.5% 组 ($P<0.05$)。随着发酵黄芪添加量的增加, 淀粉酶 ($P_L=0.03$)、脂肪酶 ($P_L=0.01$; $P_Q=0.01$) 和 β-

葡萄糖醛酸苷酶 ($P_L<0.01$; $P_Q<0.01$) 均提高。

2.8 不同水平发酵黄芪对四川白鹅表观消化率的影响
由表 10 可知, 添加不同水平发酵黄芪均提高了磷和总能的表观消化率 ($P<0.05$)。随着发酵黄芪添加量的增加, 磷 ($P_L=0.01$; $P_Q=0.03$) 和总能 ($P_Q=0.02$) 表观消化率均提高。

3 讨 论

3.1 发酵黄芪对鹅生产性能的影响
本研究中, 饲料中添加发酵黄芪, 特别是 0.2% 水平显著提高了供试鹅平均日增重和平均日采食量, 这与 Yu 等^[15]在肉雏鸡中的研究结果类似, 即多糖类物质可显著提高平均日增重,

表 10 不同水平发酵黄芪对四川白鹅表观消化率的影响 (n=6)

项目	对照组	0.2% 组	0.5% 组	0.8% 组	SEM	P 值		
						ANOVA	L	Q
钙	16.79±0.51	18.09±0.68	17.58±1.06	18.48±0.70	0.27	0.11	0.05	0.15
磷	50.32±1.06 ^b	52.06±0.41 ^a	52.05±0.80 ^a	52.60±0.96 ^a	0.33	0.04	0.01	0.03
粗蛋白质	61.87±3.15	62.78±1.91	64.66±1.72	64.69±1.54	0.65	0.35	0.07	0.20
总能	78.00±0.80 ^b	81.08±1.03 ^a	80.33±0.65 ^a	80.46±1.05 ^a	0.42	0.01	0.07	0.02

并显著降低平均日采食量和耗料增重比。可能与发酵黄芪中富含的多糖活性成分密切相关。一方面,多糖的高分支结构作为消化稳定剂,可提高肠道对营养物质的消化吸收率^[16];另一方面,多糖可上调代谢信号通路(TGF- β 1/SMAD)中关键蛋白(SMAD7b)的表达,促进细胞增殖和组织生长^[15]。低剂量发酵黄芪表现更优,这可能是因为低剂量的多糖可调控 Jak-STAT 通路,因而可适度提高免疫性能,并避免持续炎症反应,以减少能量消耗,进而使更多能量用于生长^[17]。同时,添加不同水平发酵黄芪也显著提高了鹅颈长、半潜水和龙骨长等体尺指标,以及腿肌率、胸肌率和半净膛率等屠宰性能,而腹脂率显著降低,且高水平发酵黄芪效果最为显著,说明发酵黄芪能促进骨骼发育并优化胴体组成,与 Sgavioli 等^[18]研究结果相似,即多糖化合物可促进肉鸡胫骨的发育并增加软骨细胞的数量。多糖可激活 Wnt 信号通路,促进间充质干细胞向分化为骨细胞,且可刺激成骨细胞合成并分泌胶原蛋白和骨桥蛋白等胞外基质,参与骨组织形成^[19]。Xie 等^[20]研究指出,发酵黄芪在肉鸡上同样具有增肌降脂的作用,这可能涉及对脂质代谢信号通路的调节。一方面,多糖可激活 INS/INSR-PI3K-Akt-SREBP1c 信号通路,促进肌肉生长和能量利用倾向于蛋白质的合成^[18];另一方面,多糖通过下调低密度脂蛋白和脂肪酸合成酶水平,并上调过氧化物酶体增殖物激活受体 α 水平,进而抑制脂肪沉积,促进脂肪酸氧化^[21]。此外,0.2% 水平发酵黄芪还可显著提高空肠和回肠相对长度,表明低剂量发酵黄芪可能通过提高肠道 occludin、claudin-1 和 ZO-1 等紧密连接蛋白基因的表达,以增强肠道屏障功能来促进肠道发育^[22]。而高剂量发酵黄芪中的多糖则可能导致免疫细胞中 NRF2 和 p53 的过度表达,进而引发促氧化和促炎症反应加剧,不利于肠道发育^[23]。

3.2 发酵黄芪对鹅血清生化指标的影响 本研究中,不同添加水平的发酵黄芪均可降低鹅血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶水平,说明添加发酵黄芪可改善鹅肝脏功能,

与 Alagawany 等^[24]在肉鸡上的研究结果相似,即黄芪多糖可显著降低雏鸡血清的谷丙转氨酶和谷草转氨酶水平。这可能与发酵黄芪富含的多糖和黄酮类活性成分有关。多糖组分可直接抑制肝细胞中 TLR4/JNK/NF- κ B/MyD88 信号通路相关基因的表达,减轻肝细胞膜的损伤,减少酶的释放,改善肝脏功能^[25]。黄酮类化合物不仅通过改善肠道屏障功能,减少有毒物质进入血清引起的肝脏损伤,还能显著降低 TLR-4 及其下游信号通路相关蛋白表达,抑制肝脏炎症和损伤^[26]。肝脏作为营养物质吸收转化的重要器官,其功能的改善与生长性能的提高一致。

3.3 发酵黄芪对鹅免疫性能的影响 在本研究中,不同水平发酵黄芪可提高鹅血清 IgA 和溶菌酶水平,其中 IgA 在中高剂量(0.5% 和 0.8%)组均显著提高,而溶菌酶则在中剂量(0.5%)组显著提高,揭示其免疫调节作用存在剂量效应,与 Guo 等^[27]在鹌鹑的研究结果类似,即相较于低或高剂量的黄芪,中等剂量对血清中 IgA 和补体 C3、C4 水平的影响更为突出,这可能与活性成分的协同与拮抗效应相关。一方面,多糖通过激活 NF- κ B 和 MAPK 等信号通路,提高巨噬细胞的吞噬活性、NK 细胞杀伤力以及补体系统功能,进而改善体液免疫和非特异性免疫水平^[4];另一方面,皂苷类成分可与 T 细胞表面 CD2 受体结合,促进 T 细胞活化与增殖^[28]。中剂量(0.5%)可能处于促进免疫性能提高的适宜剂量范围,而高剂量(0.8%)可能因皂苷浓度过高产生免疫抑制倾向^[29],需后续开展毒性试验验证。

3.4 发酵黄芪对鹅消化性能的影响 本研究中,添加发酵黄芪显著提高了鹅腺胃和肝脏中淀粉酶、脂肪酶和 β -葡萄糖醛酸苷酶水平,其中蛋白酶和淀粉酶分别在 0.2% 组和 0.8% 组显著提高,而 β -葡萄糖醛酸苷酶则在所有处理组均显著提高,同时显著提高总能和磷的表观消化率,与 Wu 等^[30]类似,即黄芪多糖可显著提高肉鸡淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶的活性。总体来看,发酵黄芪对提高鹅消化酶活性具有积极作用,也反映出鹅的

消化酶系统在常规饲喂条件下可能未得到充分发挥。一方面,以高能量和高蛋白为特点的常规饲料可能会引发胰岛素、胰高血糖素样肽-1的分泌异常,出现胃排空、吸收异常以及胰岛素抵抗的风险,进而降低消化酶的合成与分泌效率,而发酵黄芪则可有效抑制 *SREBP-1c* 通路,刺激胰腺 β 细胞,提高胰岛素敏感性,减轻高营养水平对胰腺等消化腺功能的不利影响,从而提高消化酶分泌量^[31]。另一方面,常规饲料所含的抗营养因子对肠道发育具有不良影响,而发酵黄芪富含的黄酮类化合物能有效上调肠道基因 *claudin-1* 和 *Tff3* 表达,增加绒毛高度和杯状细胞增殖,改善肠道发育,扩大营养物质的吸收面积,为消化酶的产生和功能发挥创造良好环境^[32]。此外,饲料中以非淀粉多糖为代表的碳水化合物对于维持肠道微生物多样性和功能至关重要,发酵黄芪则可提供更多的多糖类物质,其作为高效的益生元,不仅能通过增强肠道蠕动来加速物理性消化,还可通过促进肠道上皮功能的发挥提高消化酶的分泌水平^[33]。

3.5 发酵黄芪的剂量效应 随着发酵黄芪添加量的升高,鹅的体重、体尺和屠宰性能等生产性能呈显著的线性或二次增长趋势,表明其对鹅生长的促进作用存在剂量效应。中低剂量(0.2%和0.5%)所含的多糖或黄酮化合物即可显著上调 *occludin* 和 *ZO-1* 等肠道紧密连接蛋白的表达,以提高养分吸收效率,从而促进生长^[34],且能有效激活 *Wnt/ β -catenin* 通路以促进肌肉和骨骼的生长^[35],以及提高脂肪甘油三酯脂肪酶和肉碱棕榈酰转移酶的水平以促进脂质分解^[36]。反之,高剂量(0.8%)所含的多糖或黄酮化合物可引发胰岛素受体的丝氨酸磷酸化,削弱代谢能力,导致饲料利用效果的回落^[37],且多糖的过度积累会抑制 *Sox9* 表达,干扰跖骨的胶原合成^[38],以及过度激活触发肿瘤坏死因子 α 介导的炎症应激反应,削弱脂肪降解能力^[39]。血清代谢指标方面, *IgA* 和 *IgM* 水平随着发酵黄芪添加量的升高呈显著的线性增长趋势,主要原因可能是高剂量黄芪多糖可更有效激活胸腺和法氏囊并提高血清白介素-4和白细胞介素-6水平以促进B细胞的成熟分化,进而增强免疫球蛋白合成能力^[40]。相反,谷丙转氨酶、谷草转氨酶和碱性磷酸酶活性呈显著的线性降低趋势,这可归因于黄酮化合物剂量依赖性抑制 *CYP2E1* 酶活性,减少 *CCl₄* 等有毒中间体的活化,并通过调节 *mTOR* 通路,显著减缓肝细胞的自噬过程^[41]。此外,高密度脂蛋白呈显著的

线性增长趋势,可能源于多糖可持续促进肝脏载脂蛋白A1的合成,加强胆固醇的逆向转运效率^[42]。在消化酶活性方面,淀粉酶、脂肪酶和 β -葡萄糖醛酸酶活性均呈显著线性增长趋势。黄酮含量与编码 α -淀粉酶 *AMY2A* 基因表达量以及胆汁酸合成能力呈正相关^[43]。多糖的累积可降低炎症相关菌群的丰度,促进肠道 *IL-10* 和 *I κ B α* 表达,进而提高 β -葡萄糖醛酸酶活性^[44]。

4 结 论

本试验条件下,发酵黄芪对鹅生产、免疫及消化性能的影响具有显著的剂量效应,添加0.5%发酵黄芪可显著提高四川白鹅免疫性能,还可改善其生产性能和消化功能,而0.2%发酵黄芪对免疫球蛋白和骨骼发育的改善效果有限;0.8%发酵黄芪在促进胫骨生长与提高溶菌酶活性方面的效果低于0.5%发酵黄芪。因此,推荐0.5%发酵黄芪为适宜添加剂量。

参考文献:

- [1] Li Y, Wang J. Possible mechanism for the protective effect of active ingredients of *Astragalus membranaceus* on diabetes nephropathy[J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2024, 26(11):1276-1284.
- [2] Chen J, Ma D L, Bao J, et al. Roots of *Astragalus propinquus schischkin* regulate transmembrane iron transport and ferroptosis to improve cerebral ischemia-reperfusion injury[J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2022, 2022: 7410865.
- [3] Li C X, Liu Y, Zhang Y Z, et al. *Astragalus polysaccharide*: a review of its immunomodulatory effect[J]. *Arch Pharm Res*, 2022, 45(6): 367-389.
- [4] Auyeung K K, Han Q B, Ko J K. *Astragalus membranaceus*: a review of its protection against inflammation and gastrointestinal cancers[J]. *Am J Chin Med*, 2016, 44(1): 1-22.
- [5] Liu P, Zhao H P, Luo Y M. Anti-aging implications of *Astragalus membranaceus* (Huangqi): a well-known Chinese tonic [J]. *Aging Dis*, 2017, 8(6): 868-886.
- [6] Song W J, Zou Z H, Chen X L, et al. Effects of traditional Chinese herbal feed supplement on growth performance, immunity, antioxidant levels, and intestinal health in chickens: a study on Ningdu yellow chickens[J]. *Poult Sci*, 2023, 102(10): 102986.
- [7] Alagawany M, Farag M R, Al-Harhi M A, et al. The use of *Astragalus membranaceus* as an eco-friendly alternative for antibiotics in diets of Japanese quail breeders[J]. *Poult Sci*, 2023, 102(10): 102909.
- [8] Zhang W D, Zhang C, Liu R H, et al. Preclinical pharmacokinetics and tissue distribution of a natural cardioprotective agent astragaloside IV in rats and dogs[J]. *Life Sci*, 2006, 79(8): 808-815.
- [9] Paddon C J, Westfall P J, Pitera D J, et al. High-level semi-

- synthetic production of the potent antimalarial artemisinin[J]. *Nature*, 2013, 496(7446): 528-532.
- [10] Qiao H X, Song Y Z, Shi H T, *et al.* Fermented Astragalus in diet altered the composition of fecal microbiota in broiler chickens[J]. *AMB Express*, 2018, 8(1): 151.
- [11] Guo F C, Williams B A, Kwakkel R P, *et al.* In vitro fermentation characteristics of two mushroom species, an herb, and their polysaccharide fractions, using chicken cecal contents as inoculum[J]. *Poult Sci*, 2003, 82(10):1608-1615.
- [12] 隋明, 岳文喜, 朱克永, 等. 益生菌发酵复方中药对肉鸭生长性能和屠宰性能的影响 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2018(10): 166-168.
- [13] 耿傲盼. 发酵黄芪的功能活性变化及在断奶驹驹中饲用效果研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [14] Huang Y Z, Xu L M, He H, *et al.* Effects of rosemary extract and its residue on production, immune performance, and gut microbiota in geese[J]. *Front Microbiol*, 2025, 15: 1483626.
- [15] Yu Y G, Zhu Z Y, Ding M X, *et al.* Effect of Pseudostellaria heterophylla polysaccharide on the growth and liver metabolism of chicks[J]. *J Anim Sci*, 2023, 101: skad368.
- [16] Zhang J X, Yang X, Ji T, *et al.* Digestion and absorption properties of Lycium barbarum polysaccharides stabilized selenium nanoparticles[J]. *Food Chem*, 2022, 373(PtB): 131637.
- [17] Yan Z, Zhu L L, Hou C H, *et al.* The enhancement effect of low-dose dietary lipopolysaccharide on the growth and immunity of *Litopenaeus vannamei*, and transcriptome analysis[J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2023, 133:108517.
- [18] Sgavioli S, Santos E T, Borges L L, *et al.* Effect of the addition of glycosaminoglycans on bone and cartilaginous development of broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2017, 96(11): 4017-4025.
- [19] Witzler M, Büchner D, Shoushrah S H, *et al.* Polysaccharide-based systems for targeted stem cell differentiation and bone regeneration[J]. *Biomolecules*, 2019, 9(12): 840.
- [20] Xie Z, Zhang J, Ma S, *et al.* Effect of Chinese herbal medicine treatment on plasma lipid profile and hepatic lipid metabolism in Hetian broiler[J]. *Poult Sci*, 2017, 96(6): 1918-1924.
- [21] Huang Z F, Ye Y L, Kong L M, *et al.* Regulatory effects of Astragalus membranaceus polysaccharides on lipid metabolism disorders induced by a high-fat diet in spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*)[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 271(Pt2): 132584.
- [22] Qiao Y Y, Liu C Z, Guo Y P, *et al.* Polysaccharides derived from Astragalus membranaceus and Glycyrrhiza uralensis improve growth performance of broilers by enhancing intestinal health and modulating gut microbiota[J]. *Poult Sci*, 2022, 101(7): 101905.
- [23] Abdelaziz I, Bounaama A, Djerdjouri B, *et al.* Low-dose dimethylfumarate attenuates colitis-associated cancer in mice through M2 macrophage polarization and blocking oxidative stress[J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2024, 489: 117018.
- [24] Alagawany M, Ashour E A, El-Fakhrany H H H, *et al.* Early nutrition programming with Astragalus membranaceus polysaccharide: its effect on growth, carcasses, immunity, antioxidants, lipid profile and liver and kidney functions in broiler chickens[J]. *Anim Biotechnol*, 2022, 33(2):362-368.
- [25] Sun X, Zheng Y Q, Tian Y Q, *et al.* Astragalus polysaccharide alleviates alcoholic-induced hepatic fibrosis by inhibiting polymerase I and transcript release factor and the TLR4/JNK/NF- κ B/MyD88 pathway[J]. *J Ethnopharmacol*, 2023, 314: 116662.
- [26] Lombardo G E, Navarra M, Cremonini E. A flavonoid-rich extract of bergamot juice improves high-fat diet-induced intestinal permeability and associated hepatic damage in mice[J]. *Food Funct*, 2024, 15(19): 9941-9953.
- [27] Guo L, Hua J, Luan Z H, *et al.* Effects of the stems and leaves of Astragalus membranaceus on growth performance, immunological parameters, antioxidant status, and intestinal bacteria of quail[J]. *Anim Sci J*, 2019, 90(6):747-756.
- [28] 杨小敏, 徐晓武, 卢荷莲, 等. 黄芪皂苷对小鼠腹腔巨噬细胞的免疫增强作用 [J]. *中国免疫学杂志*, 2008(9): 804-807.
- [29] Wang H F, Yang W R, Wang Y X, *et al.* The study on the effects of Chinese herbal mixtures on growth, activity of post-ruminal digestive enzymes and serum antioxidant status of beef cattle[J]. *Agric Sci China*, 2011, 10(3): 448-455.
- [30] Wu S J. Effect of dietary Astragalus membranaceus polysaccharide on the growth performance and immunity of juvenile broilers[J]. *Poult Sci*, 2018, 97(10): 3489-3493.
- [31] Veeramani C, Alsaif M A, Al-Numair K S. Herbacetin, a flaxseed flavonoid, ameliorates high percent dietary fat induced insulin resistance and lipid accumulation through the regulation of hepatic lipid metabolizing and lipid-regulating enzymes[J]. *Chem Biol Interact*, 2018, 288: 49-56.
- [32] Oteiza P I, Cremonini E, Fraga C G. Anthocyanin actions at the gastrointestinal tract: relevance to their health benefits[J]. *Mol Aspects Med*, 2023, 89: 101156.
- [33] 常树军. 黄芪多糖对肉鸭肠道消化酶活性及菌群数量的影响 [J]. *家禽科学*, 2024, 46(3):9-13.
- [34] Wei B Q, Ren P F, Qin W T, *et al.* Sulfated fucans from algae *Saccharina japonica* promotes intestinal stem cell-mediated intestinal development in juvenile mouse by modulating the gut microbiota[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 281(Pt 2): 136207.
- [35] Illesca P G, Ferreira M D R, Benmelej A, *et al.* Salvia hispanica L. (chia) seed improves redox state and reverts extracellular matrix collagen deposition in skeletal muscle of sucrose-rich diet-fed rats[J]. *Biofactors*, 2025, 51(1): e2087.
- [36] Yang X J, Yuan Y H, Xie D S. Low molecular pectin inhibited the lipid accumulation by upregulation of METTL7B[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2021, 193(5): 1469-1481.
- [37] Sesti G. Pathophysiology of insulin resistance[J]. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab*, 2006, 20(4):665-679.
- [38] Koshimizu T, Kawai M, Kondou H, *et al.* Vinculin functions as regulator of chondrogenesis[J]. *J Biol Chem*, 2012, 287(19): 15760-15775.
- [39] Zhang G L, Pan R Y, Lai S M, *et al.* Phosphatidylserine-functional polydimethylsiloxane substrates regulate macrophage M2 polarization via modulus-dependent NF- κ B/PPAR γ

母猪妊娠后期日粮中添加亮氨酸对新生仔猪能量代谢的影响

刘 涛¹, 唐燕妮², 李 浪³, 周雪梅³, 管武太³, 陈 芳^{3*}, 邵 丹^{1,4*}

(1. 华南理工大学医学院, 广东广州 510006; 2. 咸宁市农业科学院, 湖北咸宁 437000;

3. 华南农业大学动物科学学院, 广东广州 510642; 4. 广东省人民医院, 广东广州 510080)

摘 要: 本试验旨在研究妊娠后期日粮中添加亮氨酸 (Leu) 对新生仔猪能量代谢的调控机制。选取 200 头妊娠 70 的健康长×大母猪 (胎次为 4~5 胎), 随机分为对照组、0.40% Leu 组、0.80% Leu 组和 1.20% Leu 组。试验期从母猪妊娠第 70 天开始, 至母猪分娩结束。结果显示: 妊娠 84 d, 0.40% Leu 组和 0.80% Leu 组母猪血浆高密度脂蛋白 (HDL) 降低 ($P<0.01$); 妊娠 98 d, 0.40% Leu 组甘油三酯 (TG) 下降 ($P<0.01$); 妊娠 110 d, 各 Leu 组 TG 均降低 ($P<0.01$), 0.40% Leu 组母猪血浆葡萄糖 (GLU) 升高 ($P<0.05$); 3 个处理组新生仔猪脐带血总胆固醇 (TC)、HDL 升高 ($P<0.05$), 背最长肌 TG 降低 ($P<0.05$); 0.80% Leu 组新生仔猪背最长肌中 *SIRT-1* 和 *PGC-1 α* mRNA 表达升高 ($P<0.05$), 各 Leu 组 p-AMPK 蛋白表达下降 ($P<0.05$); 0.40% Leu 组和 0.80% Leu 组新生仔猪 *ACACA*、*GPAM* 的 mRNA 和 *FASN* 蛋白表达上调 ($P<0.05$); 0.40% Leu 组新生仔猪 *ACSL1*、*CPT-1* 和 *FABP3* mRNA 表达上调 ($P<0.05$), 而 0.80% Leu 组 *CD36* 和 *FATP4* 表达下降 ($P<0.05$); 0.40% Leu 组 *SREBP1*、*PPAR α* 和 *PPAR γ* 表达下降 ($P<0.05$); 0.40% Leu 组 *PEPCK* 的 mRNA 和 0.80% Leu 组 *GLUT1* 蛋白和 *ACL* mRNA 表达增加 ($P<0.05$)。本试验条件下, 妊娠后期日粮中添加 0.4%、0.8% Leu 可提高新生仔猪背最长肌中脂肪酸和 GLU 的氧化代谢, 降低 TG 合成提高能量代谢水平, 为其促进蛋白质沉积提供能量。

关键词: 妊娠后期; 亮氨酸; 能量代谢; 母猪; 仔猪

中图分类号: S828.5

文献标识码: A

DOI 编号: 10.19556/j.0258-7033.20250606-11

目前, 我国平均断奶仔猪数 (PSY) 与发达国家仍

有较大差距, 如何通过优化母猪-仔猪饲料配方来提高仔猪存活率和发育水平, 是当前养猪业的重点问题之一。胎猪在宫内的发育与仔猪生长性能密切相关, 提高胎猪 (尤其是妊娠后期胎猪) 蛋白质沉积水平, 是促进胎猪宫内发育、提高猪生产效率的关键^[1-6]。本课题组前期研究表明, 妊娠期补充适量亮氨酸 (Leu) 可提高新生仔猪初生重^[7], 并促进背最长肌蛋白合成^[8]。Leu 是动物饲料中含量最高的必需氨基酸^[9], Leu 可调节葡萄

收稿日期: 2025-06-06; 修回日期: 2025-12-15

资助项目: 国家重点研发计划 (2021YFD1300401)

作者简介: 刘涛 (1989-), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 研究方向为动物医学健康, E-mail: 535008765@qq.com

* 通信作者: 邵丹 (1984-), 女, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为动物医学健康, E-mail: shaodan@gdph.org.cn; 陈芳 (1982-), 女, 教授, 博士研究生导师, 母猪仔猪营养健康, E-mail: chenfang1111@scau.edu.cn

pathway[J]. Biomater Adv, 2024, 165: 213997.

[40] Xu B C, Zhang L F, Li J, et al. Selenium Broussonetia papyrifera polysaccharide alleviated cyclophosphamide-induced immune suppression, growth inhibition, intestinal damage, and gut microbiota disorder in yellow-feather broilers[J]. Poult Sci, 2025, 104(4): 104907.

[41] Alipour M R, Karimi-Sales E. Molecular mechanisms of protective roles of isoflavones against chemicals-induced liver injuries[J]. Chem Biol Interact, 2020, 329: 109213.

[42] Yin F, Lin P, Yu W Q, et al. The Cordyceps militaris-Derived polysaccharide CM1 alleviates atherosclerosis in LDLR(-/-)

mice by improving hyperlipidemia[J]. Front Mol Biosci, 2021, 8: 783807.

[43] Li J H, Bi D, Nie Y, et al. Loperamide-induced constipation is associated with excessive accumulation of bile acids and cholesterol in the liver of mice; attenuation by hesperidin[J]. Food Chem Toxicol, 2025, 203: 115561.

[44] Yang J Y, Chen S Y, Wu Y H, et al. Ameliorative effect of buckwheat polysaccharides on colitis via regulation of the gut microbiota[J]. Int J Biol Macromol, 2023, 227: 872-883.

(责任编辑: 郑本艳)