

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.12.008

李常营, 徐兰梦, 何航, 等. 发酵杂交构树对四川白鹅生产性能、生理生化指标和肉品质的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(12): 71-83.

发酵杂交构树对四川白鹅生产性能、 生理生化指标和肉品质的影响

李常营¹, 徐兰梦¹, 何航², 黄榆智¹, 苑月丽¹,
彭丽娟¹, 彭凯杰¹, 万堃¹, 张传师², 曹礼静³, 章杰¹

1. 西南大学 动物科学技术学院, 重庆 荣昌 402460; 2. 重庆三峡职业学院 动物科技学院, 重庆 万州 404155;
3. 重庆市荣昌区职业教育中心, 重庆 荣昌 402460

摘要: 为探究饲料中添加发酵杂交构树对四川白鹅生产性能、血清生化指标、肉品质、消化生理和免疫的影响, 选用健康、体质量相近的 28 日龄四川白鹅 240 只, 随机分为 4 组, 每组 6 个重复, 每个重复 10 只, 分别在基础饲料中添加 0(对照), 5%, 10% 和 15% 的发酵杂交构树, 试验期 42 d. 结果显示: 与对照组相比, 1) 5% 添加组显著提高了四川白鹅的体斜长、胸骨长、总蛋白、球蛋白、甘油三酯、高密度脂蛋白、免疫球蛋白 M(IgM)、溶菌酶、脾脏指数、回肠长度、胰腺指数、十二指肠指数、回肠指数、空肠指数、绒毛高度(十二指肠)、绒毛比(十二指肠和空肠)和回肠黏膜厚度($p < 0.05$), 显著降低了四川白鹅的滴水损失率和空肠隐窝深度($p < 0.05$); 2) 10% 添加组显著提高了体斜长、回肠长度、绒毛高度(十二指肠)和绒毛比(十二指肠和空肠)($p < 0.05$), 显著降低了滴水损失率和十二指肠隐窝深度($p < 0.05$); 3) 15% 添加组显著提高了平均日增质量、球蛋白、回肠长度、肌胃指数、空肠指数、绒毛高度(十二指肠)和绒毛比(十二指肠和空肠)($p < 0.05$), 显著降低了料肉比、胸角、滴水损失率和十二指肠隐窝深度($p < 0.05$). 此外, 随着发酵杂交构树添加量的增加, 髌宽、空肠绒毛比和回肠隐窝深度呈现显著的二次关系($p < 0.05$). 综合表明饲料中添加 5% 发酵杂交构树能改善四川白鹅血清生化指标、肉品质和免疫性能, 15% 添加量能改善生长性能, 5%~10% 添加量能改善体尺性状, 5%~15% 添加量能改善消化性能.

关键词: 四川白鹅; 发酵杂交构树; 生产性能; 生理生化指标;
肉品质

中图分类号: S831.5

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2024)12-0071-13



Effects of Fermented Hybrid *Broussonetia papyrifera* on the Production Performance, Physiological and Biochemical Indexes and Meat Quality of Sichuan White Goose

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-ZXX0038); 重庆市教委科研重大项目(KJZD-M202203501).

作者简介: 李常营, 博士, 讲师, 主要从事动物健康养殖研究.

通信作者: 章杰, 博士, 副教授, 硕士研究生导师.

LI Changying¹, XU Lanmeng¹, HE Hang², HUANG Yuzhi¹,
YUAN Yueli¹, PENG Lijuan¹, PENG Kaijie¹, WAN Kun¹,
ZHANG Chuanshi², CAO Lijing³, ZHANG Jie¹

1. College of Animal Science and Technology, Southwest University, Rongchang Chongqing 402460, China;

2. College of Animal Science and Technology, Chongqing Three Gorges Vocational College,
Wanzhou Chongqing 404155, China;

3. Chongqing Rongchang District Vocational Education Center, Rongchang Chongqing 402460, China

Abstract: The experiment was to explore the effects of fermented hybrid *Broussonetia papyrifera* on the production performance, physiological and biochemical indexes and meat quality of Sichuan White goose. Using single factor design, a total of 240 healthy, 28-day-old Sichuan white geese with basically the same body condition, were randomly divided into 4 groups with 6 replicates in each group and 10 geese in each replicate. Each experimental group were supplemented with 0 (control group), 5%, 10%, and 15% of fermented hybrid *B. papyrifera* in the diet. The test period was 42 days. The results showed that compared with the control group, 1) The supplementation of 5% fermented hybrid *B. papyrifera* significantly increased the body slope length, sternum length, TP, GLO, TG, HDL, IgM, lysozyme, spleen index, ileum length, pancreatic index, duodenal index, ileum index, jejunum index, villus height of duodenum, VCR of duodenum and jejunum and mucosal thickness of ileum ($p < 0.05$), significantly decreased the drip loss rate and crypt depth of jejunum ($p < 0.05$); 2) The supplementation of 10% fermented hybrid *B. papyrifera* significantly increased the body slope length, ileum length, villus height of duodenum, VCR of duodenum and jejunum ($p < 0.05$), significantly decreased the drip loss rate and crypt depth of duodenum ($p < 0.05$); 3) The supplementation of 15% fermented hybrid *B. papyrifera* significantly increased the ADG, GLO, ileum length, muscle stomach index, jejunum index, villus height of duodenum, and VCR of duodenum and jejunum ($p < 0.05$), significantly decreased the F/G, chest angle, drip loss rate and crypt depth of duodenum ($p < 0.05$). Furthermore, with the increase of fermented hybrid *B. papyrifera*, the hip width, VCR of jejunum and crypt depth of ileum showed significant quadratic relationship ($p < 0.05$). The results indicate that adding 5% fermented hybrid *B. papyrifera* to the diet of Sichuan White geese improved serum biochemical indicators, meat quality, and immune performance. 15% of supplementation improved growth performance, 5%–10% of supplementation improved body size traits, and 5%–15% of supplementation improved digestive performance.

Key words: Sichuan white geese; fermented hybrid *Broussonetia papyrifera*; production performance; physiological and biochemical indexes; meat quality

随着人们生活水平的提高,对畜产品需求量急剧增加,推动了畜牧业的快速发展,随之而来的“人畜争粮”问题日益显现。我国饲料资源缺乏,尤其是蛋白原料长期依靠进口,严重制约了饲料和养殖业的发展。我国有丰富的非常规饲料资源,如何挖掘新型稳定的饲料资源,减轻蛋白原料资源短缺的压力是当前亟须解决的问题。构树(*Broussonetia papyrifera*)是一种桑科落叶多年生植物,广泛分布于中国、日本等亚洲国家,其蛋白质质量分数高(约为 20%)、富含植物活性成分,如类黄酮、多糖和萜类化合物,具有抗菌、抗炎和抗氧化的特性^[1-2]。构树还具有生长快、产量高、品质好、多割、多抗等特点,是一种潜在的新型蛋白原料候选物^[3-4]。新鲜构树含有的单宁、生物碱等成分,会与饲料中的蛋白质、多糖等营养物质结合产生沉淀,降低动物对营养物质的消化率^[5],因此,要先对构树进行发酵处理,消除其不利成分,并将难以消化的物质转化为易消化的物质,同时降低有害微生物,提升风味和香味,延长保存

期等^[6]。鹅是一种重要的经济水禽, 在中国存栏量占世界总存栏量的 94%, 为人类提供了营养丰富的肉、蛋、肝脏, 以及生产被褥和衣物的羽毛等^[7-8]。目前, 构树发酵饲料因其营养特点在畜禽生产上得到了广泛的应用。Zhu 等^[9]研究显示, 发酵构树饲料可改善蛋鸡肠道菌群, 增加放线菌门和弯曲杆菌属的丰度, 以促进营养物质的吸收。Niu 等^[10]研究指出, 发酵杂交构树可改善蛋鸡采食量、蛋黄颜色和脂质代谢。Zhao 等^[11]研究也指出, 发酵杂交构树可提高奶山羊乳中不饱和脂肪酸含量和乳腺上皮细胞活力, 促进细胞内甘油三酯的积累和脂滴的形成, 并显著上调乳脂合成相关基因的表达, 能提高奶山羊的产乳质量。综合来看, 构树发酵的应用更多集中于反刍动物, 而单胃动物的应用相对较少, 这可能与单胃动物的消化道不能很好利用发酵杂交构树有关。鹅有发达的盲肠, 含有丰富的微生物菌群, 具有与反刍动物瘤胃相似的功能, 推测鹅能有效利用发酵杂交构树以替代一定比例的传统蛋白原料。本试验以四川白鹅为研究对象, 研究发酵杂交构树对其生产性能、血清生化指标、肉品质及消化器官的影响, 旨在为肉鹅非常规蛋白原料的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用健康、体质量相近的 28 日龄四川白鹅 240 只, 随机分为 4 组, 每组 6 个重复, 每个重复 10 只, 分别在饲料中添加 0(对照), 5%, 10% 和 15% 的发酵杂交构树, 发酵杂交构树为全株发酵, 营养成分见表 1。基础饲料参照 NRC(1994) 鹅的营养需要配制, 其组成及营养水平见表 2。饲养方式采用地面平养, 常规免疫程序, 自由采食饮水, 每日饲喂 4 次(07: 30, 12: 30, 17: 00, 21: 00), 为期 42 d。试验期环境温度为 32.09 ± 6.29 °C, 湿度为 $82.5\% \pm 3.89\%$ 。

表 1 发酵杂交构树主要营养水平(风干基础) %

营养物质	粗蛋白质	粗脂肪	粗纤维	粗灰分	钙	磷
水平	21.15	4.90	28.30	10.70	1.74	0.36

表 2 基础饲料组成及营养水平(风干基础)

项目	组别			
	0	5%	10%	15%
原料/%				
玉米	54.00	53.00	49.50	47.70
麦麸	13.00	11.00	11.85	11.00
豆粕	14.50	12.50	10.50	9.00
米糠	10.85	10.85	10.50	10.00
蚕蛹	2.00	2.00	2.00	2.00
磷酸氢钙	0.85	0.85	0.85	0.85
石粉	1.35	1.35	1.35	1.00
食盐	0.20	0.20	0.20	0.20
L-赖氨酸(98%)	0.08	0.08	0.08	0.08
DL-蛋氨酸	0.05	0.05	0.05	0.05
氯化胆碱	0.12	0.12	0.12	0.12
预混料	2.00	2.00	2.00	2.00

续表 2

项目	组别			
	0	5%	10%	15%
砂	1.00	1.00	1.00	1.00
发酵杂交构树	0	5.00	10.00	15.00
合计	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平				
代谢能/(MJ·kg ⁻²)	10.37	10.10	10.16	10.35
粗蛋白质	15.51	15.32	15.31	15.38
粗纤维	5.21	5.30	5.37	5.33
钙	0.78	0.85	0.89	0.88
磷	0.40	0.38	0.38	0.37
蛋氨酸	0.32	0.31	0.30	0.30
赖氨酸	0.88	0.84	0.81	0.80

注：预混料为每千克饲料提供：维生素 A 40 000 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，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。代谢能为计算值，其余为实测值。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 生产性能

记录试验初始、结束质量和采食量，计算平均日增质量(ADG)、平均日采食量(ADFI)和料肉比(F/G)，并参照 NY/T 823—2020《家禽生产性能名词术语和度量统计方法》对体尺进行测定，包括：体斜长、胸宽、胸深、胸骨长、胫长、胫围、髌宽、胸角和颈长。

1.2.2 血清生化指标和免疫性能

70 日龄时禁食 8 h，每个重复随机选取 6 只四川白鹅称质量、屠宰，使用抗凝血真空采血管，采集颈静脉血液 10 mL，4 ℃低温放置 24 h 后，以 4 000 r/min 离心 15 min，收集上清液，用全自动血液生化分析仪测定谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、碱性磷酸酶(ALP)、总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、球蛋白(GLO)、尿素(UA)、总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白(HDL)、低密度脂蛋白(LDL)和乳酸脱氢酶(LDH)。溶菌酶活性采用比浊法测定，以溶菌酶细胞为底物；免疫球蛋白 A(IgA)、免疫球蛋白 G(IgG)和免疫球蛋白 M(IgM)的活性采用单克隆抗体免疫比浊法测定。

1.2.3 肉品质

屠宰后，取左侧胸肌，剔除筋膜和脂肪组织，分为两部分：一部分测定物理指标，另一部分剪碎后用以测定化学组成。

水分测定参照 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》，直接干燥法；粗脂肪测定参照 GB 5009.6—2016《食品中粗脂肪的测定》，索式抽提法；灰分测定参照 GB 5009.4—2016《食品中灰分的测定》，灼烧法；粗蛋白测定参照 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》，凯氏定氮法；pH 值测定参照 NY/T 1333—2007《畜禽肉质的测定》，pH 酸度计测定；肉色于宰后 45 min，分别在室内自然光下采用色差仪检测左侧胸肌深层肌肉的亮度(L*)、红度(a*)和黄度(b*)值，随机选取 3 个不同位置检测；滴水损失率测定参照 NY/T 1333—2007《畜禽肉质的测定》。

1.2.4 消化器官

屠宰后立即分离出消化器官(肝脏、脾脏、腺胃、肌胃、胰腺、十二指肠、空肠以及回肠)，除去表面黏

膜及内容物,用生理盐水反复洗涤干净并称质量,计算消化器官指数(I):

$$I=(W_{\text{器官}}/W_{\text{活体}})\times 100\%$$

式中: $W_{\text{器官}}$ 为各器官质量; $W_{\text{活体}}$ 为宰前活体质量.

测量十二指肠、空肠以及回肠的长度.肠道形态采用经典苏木精 & 伊红染色法进行测定:用 Tris 缓冲盐水冲洗采集的肠段,4%多聚甲醛固定,石蜡包埋,切成 $5\mu\text{m}$ 厚的切片,染色后在 22 倍放大镜下拍照,采用 Image Pro Plus 6.0 对绒毛高度、隐窝深度和黏膜厚度进行测量,并计算绒隐比.

1.3 统计分析

使用 SPSS 27.0 进行数据的单因素方差(ANOVA)及多重比较分析,并利用线性(L)和二次(Q)回归方程拟合发酵杂交构树添加量的影响, $p<0.05$ 表示差异有统计学意义.

2 结果与分析

2.1 发酵杂交构树对四川白鹅生长性能和体尺的影响

2.1.1 对生长性能的影响

由表 3 可知,15%添加组平均日增质量显著高于对照组及其他添加组($p<0.05$),而料肉比显著低于对照组($p<0.05$).

表 3 发酵杂交构树对四川白鹅生长性能的影响

项目	组别				标准误	p 值		
	0	5%	10%	15%		ANOVA	L	Q
平均日增质量/g	51.04b	52.30b	52.79b	55.80a	0.57	0.01	0.05	0.21
平均日采食量/g	202.22a	194.29a	199.26a	198.37a	1.53	0.55	0.75	0.63
料肉比	3.97a	3.73ab	3.78ab	3.56b	0.51	0.03	0.10	0.43

注:小写字母不同表示 $p<0.05$, 差异有统计学意义.

2.1.2 对体尺的影响

由表 4 可知,与对照组相比,5%添加组显著增加了体斜长和胸骨长($p<0.05$);10%添加组显著增加了体斜长($p<0.05$),显著降低了胸宽($p<0.05$);15%添加组显著降低了胸角($p<0.05$).此外,随着添加量的增加,髌宽呈现显著的二次回归响应($p=0.03$),其中 5%水平最低.

表 4 发酵杂交构树对四川白鹅体尺的影响

项目	组别				标准误	p 值		
	0	5%	10%	15%		ANOVA	L	Q
体斜长/cm	26.33b	32.68a	33.32a	29.75ab	0.83	0.004	0.56	0.06
胸宽/mm	85.33a	83.20a	73.14b	79.85ab	1.62	0.03	0.36	0.60
胸深/mm	106.58a	114.11a	108.19a	112.62a	1.93	0.49	0.56	0.86
胸骨长/cm	18.42b	22.42a	19.55b	18.33b	0.46	<0.001	0.80	0.58
胫长/mm	120.80a	123.96a	116.87a	120.97a	1.50	0.45	0.70	0.96
胫围/cm	5.83a	5.92a	6.30a	6.08a	0.10	0.41	0.29	0.56
髌宽/mm	59.87a	57.10a	58.91a	64.52a	1.29	0.21	0.36	0.03
颈长/cm	26.43a	29.08a	28.28a	31.25a	0.68	0.08	0.12	0.47
胸角/ $^{\circ}$	77.39a	71.10ab	79.17a	63.66b	1.83	0.004	0.39	0.70

注:小写字母不同表示 $p<0.05$, 差异有统计学意义.

2.2 发酵杂交构树对四川白鹅血清生化指标和免疫性能的影响

2.2.1 对血清生化指标的影响

由表 5 可知,与对照组相比,5%添加组总蛋白、球蛋白、甘油三酯和高密度脂蛋白显著升高($p<0.05$),15%添加组球蛋白也显著升高($p<0.05$).此外,5%添加组碱性磷酸酶(ALP)浓度显著高于15%添加组.

表 5 发酵杂交构树对四川白鹅血清生化指标的影响

项目	组别				标准误	p 值		
	0	5%	10%	15%		ANOVA	L	Q
谷丙转氨酶/(U·L ⁻¹)	12.03a	12.33a	12.11a	12.07a	0.34	0.99	0.74	0.77
谷草转氨酶/(U·L ⁻¹)	17.33a	17.33a	20.67a	17.67a	1.56	0.89	0.65	0.77
碱性磷酸酶/(U·L ⁻¹)	1 232.00ab	1 254.00a	1 229.67ab	1 220.33b	4.75	0.05	0.46	0.56
谷草/谷丙	2.46a	2.42a	3.35a	2.57a	0.21	0.18	0.65	0.79
总蛋白/(g·L ⁻¹)	24.30b	32.16a	23.43b	28.21ab	1.25	0.01	0.90	0.97
白蛋白/(g·L ⁻¹)	11.37a	14.57a	10.77a	12.73a	0.63	0.13	0.98	0.98
球蛋白/(g·L ⁻¹)	12.93c	17.59a	12.67c	15.47b	0.66	0.001	0.85	0.96
白球比	0.88a	0.82a	0.85a	0.83a	0.22	0.85	0.35	0.68
尿素/(mmol·L ⁻¹)	0.23a	0.31a	0.22a	0.26a	0.02	0.54	0.91	0.95
总胆固醇/(mmol·L ⁻¹)	3.30a	4.65a	3.16a	3.97a	0.27	0.17	0.90	0.97
甘油三酯/(mmol·L ⁻¹)	0.43bc	0.64a	0.54ab	0.34bc	0.03	0.003	0.64	0.19
高密度脂蛋白/(mmol·L ⁻¹)	2.04b	2.89a	2.20b	2.10b	0.12	0.01	0.83	0.70
低密度脂蛋白/(mmol·L ⁻¹)	1.12a	1.61a	1.17a	1.31a	0.10	0.37	0.94	0.88
乳酸脱氢酶/(U·L ⁻¹)	215.00a	247.33a	246.67a	241.67a	10.74	0.41	0.33	0.24

注:小写字母不同表示 $p<0.05$, 差异有统计学意义.

2.2.2 对免疫性能的影响

由表 6 可知,与对照组相比,5%添加组能够显著升高免疫球蛋白 M(IgM)、溶菌酶和脾脏指数($p<0.05$).

表 6 发酵杂交构树对四川白鹅免疫性能的影响

项目	组别				标准误	p 值		
	0	5%	10%	15%		ANOVA	L	Q
免疫球蛋白 A/(g·L ⁻¹)	0.54a	0.59a	0.53a	0.52a	0.11	0.18	0.48	0.67
免疫球蛋白 G/(g·L ⁻¹)	2.11a	2.33a	2.15a	2.16a	0.37	0.18	0.95	0.77
免疫球蛋白 M/(g·L ⁻¹)	1.78b	2.02a	1.82b	1.81b	0.29	0.01	0.89	0.74
溶菌酶/(U·L ⁻¹)	8.62b	9.74a	8.90b	8.92b	0.13	0.004	0.98	0.75
脾脏指数/%	0.10b	0.13a	0.11ab	0.10b	0.005	0.03	0.80	0.57

注:小写字母不同表示 $p<0.05$, 差异有统计学意义.

2.3 发酵杂交构树对四川白鹅肉品质的影响

由表 7 可知,与对照组相比,添加组显著降低了肌肉滴水损失率($p<0.05$),且 5%添加组显著升高了粗脂肪质量分数($p<0.05$).

表 7 发酵杂交构树对四川白鹅肉品质的影响

项目	组别				标准误	p 值		
	0	5%	10%	15%		ANOVA	L	Q
水分/%	72.35a	71.68a	71.83a	72.01a	0.14	0.41	0.10	0.36
粗脂肪/%	1.89b	2.52a	2.21b	2.04b	0.08	0.002	0.95	0.81
灰分/%	1.36a	1.63a	1.30a	1.47a	0.54	0.13	0.98	0.98
粗蛋白/%	21.70a	22.70a	22.32a	21.66a	0.21	0.22	0.87	0.29
pH 值	6.19a	6.22a	6.31a	6.20a	0.03	0.40	0.70	0.62
亮度	29.57a	26.25a	27.29a	27.57a	0.45	0.05	0.54	0.48
红度	13.41a	14.66a	15.65a	14.92a	0.35	0.15	0.24	0.20
黄度	10.40a	9.97a	10.97a	10.89a	0.24	0.45	0.31	0.69
滴水损失率/%	5.88a	5.28b	5.41b	5.39b	0.07	0.01	0.34	0.43

注：小写字母不同表示 $p<0.05$ ，差异有统计学意义。

2.4 发酵杂交构树对四川白鹅消化器官的影响

2.4.1 对消化器官指数及肠道长度的影响

由表 8 可知，与对照组相比，添加组显著增加了回肠长度，同时 5%添加组显著升高了胰腺、十二指肠、回肠和空肠指数($p<0.05$)，15%添加组显著升高了肌胃和空肠指数($p<0.05$)。

表 8 发酵杂交构树对四川白鹅消化器官指数的影响

项目	组别				标准误	p 值		
	0	5%	10%	15%		ANOVA	L	Q
肝脏指数/%	1.82a	1.73a	1.76a	1.73a	0.05	0.93	0.25	0.49
胰腺指数/%	0.24b	0.30a	0.20b	0.22b	0.01	0.01	0.53	0.81
肌胃指数/%	1.94b	2.85b	3.13ab	3.44a	0.08	0.02	0.12	0.16
腺胃指数/%	0.28a	0.28a	0.34a	0.40a	0.02	0.15	0.07	0.19
十二指肠指数/%	0.30b	0.45a	0.29b	0.30b	0.19	<0.001	0.73	0.81
回肠指数/%	0.59b	0.69a	0.55b	0.56b	0.16	0.004	0.53	0.79
空肠指数/%	0.34b	0.50a	0.40ab	0.47a	0.21	0.03	0.43	0.74
十二指肠长度/cm	40.28a	38.20a	34.85a	36.15a	1.09	0.33	0.15	0.32
空肠长度/cm	75.08a	77.52a	74.88a	75.20a	1.51	0.93	0.76	0.84
回肠长度/cm	67.30b	82.08a	78.30a	76.82a	1.75	0.01	0.49	0.43

注：小写字母不同表示 $p<0.05$ ，差异有统计学意义。

2.4.2 对肠道形态的影响

由表 9 可知，与对照组相比，添加组显著增加了绒毛高度(十二指肠)和绒隐比(十二指肠和空肠)($p<0.05$)，5%添加组显著增加了回肠黏膜厚度($p<0.05$)，而 10%和 15%添加组显著降低了十二指肠隐窝深度($p<0.05$)，以及 5%添加组显著降低了空肠隐窝深度($p<0.05$)。此外，随着添加量的增加，空肠绒隐比和回肠隐窝深度呈现显著的二次回归关系($p<0.05$)，分别以 10%和 5%添加量为优。

表 9 发酵杂交构树对四川白鹅肠道形态的影响

项目	组别				标准误	p 值			
	0	5%	10%	15%		ANOVA	L	Q	
十二指肠									
绒毛高度/ μm	997.40b	1 300.43a	1 198.32a	1 204.17a	27.48	<0.001	0.47	0.52	
隐窝深度/ μm	277.06a	284.53a	251.91b	249.19b	3.83	<0.001	0.16	0.51	
绒隐比	3.60b	4.58a	4.77a	4.83a	0.12	<0.001	0.12	0.15	
黏膜厚度/ μm	1 591.70ab	1 695.39a	1 508.28b	1 499.31b	23.37	0.003	0.34	0.67	
空肠									
绒毛高度/ μm	1 212.46a	1 283.46a	1 350.84a	1 244.49a	20.75	0.09	0.65	0.37	
隐窝深度/ μm	280.58a	256.55b	264.19ab	261.33ab	3.39	0.06	0.38	0.52	
绒隐比	4.32b	5.00a	5.13a	4.77a	0.09	0.002	0.47	0.02	
黏膜厚度/ μm	1 273.56ab	1 394.95a	1 241.96ab	1 205.90b	25.36	0.04	0.44	0.62	
回肠									
绒毛高度/ μm	807.22a	842.06a	816.99a	813.92a	8.62	0.53	0.96	0.69	
隐窝深度/ μm	209.45a	214.31a	210.84a	196.88a	3.32	0.28	0.30	0.04	
绒隐比	3.86a	3.94a	3.91a	4.14a	0.07	0.47	0.15	0.39	
黏膜厚度/ μm	1 006.39b	1 183.94a	1 084.20b	1 071.59b	17.99	0.001	0.83	0.64	

注：小写字母不同表示 $p<0.05$ ，差异有统计学意义。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 发酵杂交构树对四川白鹅生长性能和体尺的影响

生长性能和体尺是反映动物生长发育的重要参数，体尺可直接或间接影响生长性能^[12]。本研究中，15%添加组可显著增加平均日增质量并降低料肉比，这与构树具有较高的粗蛋白质量分数、容易被消化吸收的特性相关，且构树所具有的高质量蛋白质是提升饲料转化率的关键。构树富含的维生素、氨基酸和矿物质是体内多种消化酶的辅因子，可促进消化酶的产生^[13-14]。此外，构树含有的黄酮类化合物可刺激肠道激素的分泌以促进肠道的消化吸收，同时还可调节脂类和碳水化合物代谢相关酶的活性^[15-16]。Widodo 等^[17]研究指出，黄酮类化合物对肉鸡饲料转化率和体质量有积极的影响。本研究结果表明发酵杂交构树提高四川白鹅的体斜长、胸骨长，这主要得益于构树富含 Ca，P 等矿物质，能够改善肠道对 Ca，P 的吸收，进而促进骨骼的生长发育^[18]。构树提取物芦丁和达普诺瑞汀可增强 MC3T3-E1 细胞向成骨细胞分化，并抑制 RANKL 诱导的 RAW264.7 细胞的分化，进而促进骨骼的形成^[19]。综合来看，5%添加组对体尺改善效果好于 10%和 15%添加组，说明构树适宜添加剂量可改善四川白鹅的体尺性状。Chen 等^[20]的研究指出，构树所含芦丁摄入过多会影响 Ca，P 等矿物质的消化吸收。芦丁在肠道中不能被消化吸收，需要较强的肠道消化能力将芦丁分解成槲皮素发挥其功能，这与本研究 5%添加组具有更长回肠长度的结果一致。

3.1.2 发酵杂交构树对四川白鹅血清生化指标和免疫性能的影响

血清生化指标反映了动物的生理健康状态，比如 ALT，AST 和 ALP 与肝脏健康密切相关，肝细胞受损时释放进入血液导致其浓度升高^[21]。LDH 为糖酵解途径的关键酶，若发生细胞膜通透性改变、细胞坏死、代谢加速等情况就会引起血清 LDH 活性的升高^[22]。本研究中，发酵杂交构树对血清 ALT，AST，

ALP 和 LDH 浓度影响不明显, 表明发酵杂交构树不会对四川白鹅肝脏等器官组织造成伤害. 张生伟等^[23]研究也指出, 青贮杂交构树对杜湖杂交肉羊 ALT 和 AST 无影响. 血清 TP 水平反映了肝脏合成蛋白质的能力. 本研究中, 5% 添加组提高了血清 TP 水平, 而对血清 UA 浓度无影响, 可能与构树发酵后其蛋白质更易被消化吸收有关, 进而促进了蛋白质的合成. Tao 等^[24]和范玥等^[25]研究指出, 饲料中发酵构树的添加对肉牛和湖羊血液 TP 水平无影响, 这可能是物种差异所致. TG 和 HDL 反映了机体能量和脂质代谢的合成能力, 其中 TG 主要储存在脂肪组织中, 为细胞代谢提供能量, 以及固定并保护内脏; HDL 可将周围组织的胆固醇运载到肝脏进行代谢, 从而维持细胞内胆固醇浓度的相对稳定^[26]. 本研究中, 5% 添加组显著提高了血清 TG 和 HDL 水平, 表明发酵杂交构树在一定程度上可促进脂质的生成和积累. Niu 等^[10]研究也显示, 发酵杂交构树可提高蛋鸡血清 HDL 浓度.

免疫性能反映了机体对疾病抵抗能力的强弱, 比如 GLO 是动物体液免疫的主要成分, 其水平是评估机体免疫力高低的主要指标, 通过测定血清中 IgA, IgM 和 IgG 来衡量. 本研究中, 5% 添加组显著提高了血清中 IgM 水平. 构树富含的黄酮、总酚和抗氧化活性等成分可有效提高机体的免疫力^[27]. 5% 添加组还可显著提高血清溶菌酶和脾脏指数. 溶菌酶是先天免疫系统的重要防御物质, 可通过稳定肠道微生物平衡和增强抗氧化能力来促进机体的健康和生长^[28]. 脾脏是最大且高效的免疫器官, 含有大量的免疫活性细胞及其所介导的免疫因子, 在体液和细胞免疫中均能发挥重要作用^[29-30]. Si 等^[31]研究指出青贮构树显著提高了奶牛血清的免疫球蛋白浓度. 构树含有较高的硒元素, 硒是抗氧化剂谷胱甘肽的主要成分, 有利于疾病的预防^[32-33]. Shojadoost 等^[34]研究显示, 饲料中添加硒可增强禽类免疫系统抵抗疾病的能力. 此外, 构树多糖可提高肠道微生物的多样性, 进而促进肠道黏膜免疫的发展^[35], 构树根部的代谢产物还具有抗炎的作用^[36].

3.1.3 发酵杂交构树对四川白鹅肉品质的影响

肉品质反映了肉品的消费性能和潜在价值, 与肉品内在质量密切相关, 是肉品物理和化学特性的综合体现. 比如肌肉 pH 值是影响肉品质的重要因素, 反映了屠宰后肌糖元的酵解强度和速度^[37]. 肉色是肌肉内部状态的综合表现, 是消费者对肉品质进行评价的主要依据. 水分的多少影响肉的组织状态以及后续的加工质量和贮藏特性, 而粗蛋白则直接决定肉的营养价值. 本研究中, 发酵杂交构树对肌肉 pH 值、肉色 L*, a*, b*, 水分、灰分和粗蛋白影响不明显, 说明发酵杂交构树基本不会对四川白鹅肉品质造成负面影响. 此外, 发酵杂交构树显著降低了滴水损失率, 且 5% 添加组显著提高了粗脂肪量, 说明发酵杂交构树对四川白鹅肉品质有一定的积极作用. 肌肉保水能力与滴水损失率相关, 滴水损失率越小, 水分保持能力越强, 熟肉率越高^[38]. 构树中黄酮类、多糖类和生物碱类物质的抗氧化功能与滴水损失率的降低有关, 研究发现抗氧化剂可保护膜免受磷脂酶的作用, 减少因磷脂酶活性降低而引起的水分损失^[39-41]. 脂肪不仅具有较高的营养价值, 也是肉风味的前体物质, 具有改善肉品质及风味的作用^[42]. 构树本身含有的及发酵产生的有机酸、酶和多糖等生物活性成分能有效调节机体脂质代谢相关因子. 张生伟等^[23]研究显示, 饲料中添加构树青贮能够提高杜湖杂交肉羊肌肉粗脂肪量, 提高营养价值. Yang 等^[43]研究指出, 发酵饲料能提高背最长肌脂质生成相关基因 *FASN*, *PPAR γ* , *DGAT2* 和 *HNF-4 α* 的表达量, 同时降低脂质分解相关基因 *IL-15* 的表达量.

3.1.4 发酵杂交构树对四川白鹅消化器官的影响

消化器官是动物实现新陈代谢功能的重要场所, 与生长速度密切相关^[44]. 本研究中, 构树添加显著增加了回肠长度, 且 5% 添加组显著升高了胰腺、十二指肠、回肠和空肠指数, 15% 添加组显著升高了肌胃和空肠指数, 表明发酵杂交构树可刺激消化器官, 尤其是肠道的生长发育. 肠道是营养吸收的主要部位, 具有调节免疫、营养物质消化和吸收的功能, 其长度和质量反映了动物对营养物质的吸收能力, 长度越长,

质量越大,对营养的吸收能力越强^[45]。构树在发酵过程中产生糖类物质,进而增加饲料在肠道内的黏度。Annison^[46]研究指出,消化器官的相对质量与肠道食糜黏度存在正相关。此外,发酵构树会降低胃液的 pH 值,刺激胃功能引起肌胃质量的增加。

肠道形态可揭示动物肠道的健康状况,其中肠道绒毛高度和隐窝深度反映了肠上皮细胞的消化吸收能力。绒毛高度增加表明肠道与食糜接触的面积大,能充分吸收营养物质;隐窝深度与肠上皮细胞增殖率成反比,其降低表明肠黏膜上皮绒毛吸收能力增强^[47]。绒毛比反映了肠黏膜的发育情况,绒毛比高表明发育好,结构完善,杯状细胞数量多,可分泌更多黏蛋白,提高黏膜的免疫保护能力。黏膜厚度升高代表抵御外界病原体的屏障能力强^[48]。本研究中,发酵杂交构树可不同程度地增加绒毛高度、绒毛比和黏膜厚度,并降低隐窝深度,说明发酵杂交构树对改善四川白鹅肠道形态具有积极的作用。这可能与构树富含多糖类成分能增强肠道免疫力有关,并且还能提高肠道菌群的多样性,调节优势菌群及其代谢产物的相对丰度,以此改善肠道形态^[1]。Liao 等^[49]研究指出,黄芪多糖可改善因感染番鸭呼肠孤病毒引起的雏鸭肠道形态的损伤。此外,构树含有丰富的维生素与肠道菌群具有很强关联性,可保护肠上皮屏障的完整性并抑制致病菌的扩张^[50]。

3.1.5 发酵杂交构树添加量对四川白鹅的影响

本研究中,发酵杂交构树的添加对空肠绒毛比和回肠隐窝深度呈现二次回归关系,以 10%或 5%水平更优,更高的添加量仅对平均日增质量更有效。发酵杂交构树蛋白质质量分数较高,随着添加量的增加导致饲料中蛋白质质量分数升高,对四川白鹅的体质量增长具有正面效应。发酵杂交构树从整体上来看缺少微量元素,高水平的添加量则会影响肠道形态的发育。另外,杂交构树发酵后仍然含有低水平的单宁、生物碱等有害成分,添加量的增加则会引起有害成分在饲料中相应升高,进而影响肠道的健康。陶振阳等^[51]研究指出,1.5%和 3%的发酵构树对蛋鸡产蛋量无影响,而 4.5%添加量显著降低了平均日产蛋量。Niu 等^[10]研究指出,1%发酵杂交构树可改善产蛋鸡采食量、蛋黄颜色和脂质代谢,而 5%添加量则导致蛋壳质量下降。其他动物的研究也显示出类似结果,如添加 100%青贮杂交构树显著降低了山羊瘤胃液乙酸的产生量,而 50%添加量则无不利影响^[52]。对湘沙猪的研究显示,与添加 30%发酵杂交构树相比,20%添加量更能提高脂肪酸酶活性^[53]。综上所述,合理控制发酵杂交构树的添加量十分必要,适量添加可使畜禽保持健康状态并促进生长,提高产品品质。

3.2 结论

饲料中添加 5%~15%的发酵杂交构树可不同程度地改善四川白鹅各方面的性能,不同添加量的影响存在一定的差异。5%添加量能改善血清生化指标、肉品质和免疫性能,15%添加量能改善生长性能,5%~10%添加量能改善体尺性状,5%~15%添加量均能改善消化性能,说明发酵杂交构树部分替代四川白鹅常规饲料原料是可行的。

参考文献:

- [1] XU B C, HAO K Y, CHEN X G, et al. *Broussonetia papyrifera* Polysaccharide Alleviated Acetaminophen-Induced Liver Injury by Regulating the Intestinal Flora [J]. *Nutrients*, 2022, 14(13): 2636.
- [2] GUO P, HUANG Z Q, LI X K, et al. Transcriptome Sequencing of *Broussonetia papyrifera* Leaves Reveals Key Genes Involved in Flavonoids Biosynthesis [J]. *Plants*, 2023, 12(3): 563.
- [3] 闫东方,周玮,王鑫,等. 不同酸碱腐蚀处理方式及温度和光照强度对构树种子萌发的影响 [J]. *南方农业学报*, 2019, 50(5): 1057-1063.
- [4] TIAN H C, CHEN Y Y, ZHU N, et al. Effect of *Broussonetia papyrifera* Silage on the Serum Indicators, Hindgut

Parameters and Fecal Bacterial Community of Holstein Heifers [J]. AMB Express, 2020, 10(1): 197.

[5] LI M, YU Q, XU J, et al. Effect of Different Organic Acid Additives on The Fermentation Quality and Bacterial Community of Paper Mulberry (*Broussonetia papyrifera*) Silage [J]. Frontiers In Microbiology, 2022(13): 1038549.

[6] CHENG Q M, LI M Y, FAN X Y, et al. Effects of Epiphytic and Exogenous Lactic Acid Bacteria on Fermentation Quality and Microbial Community Compositions of Paper Mulberry Silage [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 973500.

[7] PINGEL H, GERMANY L. Waterfowl Production for Food Security [J]. Lohmann Information, 2011, 46(2): 32.

[8] GAO G L, ZHAO X Z, LI Q, et al. Genome and Metagenome Analyses Reveal Adaptive Evolution of the Host and Interaction with the Gut Microbiota in the Goose [J]. Scientific Reports, 2016(6): 32961.

[9] ZHU Y P, TAO Z Y, CHEN X C, et al. Effects of *Broussonetia papyrifera*-Fermented Feed on Production Performance, Egg Quality, and Caecal Microbiota of Laying Hens during the Late Laying Period [J]. Italian Journal of Animal Science, 2022, 21(1): 659-672.

[10] NIU K M, WANG Y F, LIANG X X, et al. Impact of Fermented *Broussonetia papyrifera* on Laying Performance, Egg Quality, Lipid Metabolism, and Follicular Development of Laying Hens [J]. Poultry Science, 2023, 102(5): 102569.

[11] ZHAO M J, LV D L, HU J C, et al. Hybrid *Broussonetia papyrifera* Fermented Feed Can Play a Role through Flavonoid Extracts to Increase Milk Production and Milk Fatty Acid Synthesis in Dairy Goats [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2022(9): 794443.

[12] MUNIM T, OIKAWA T, IBI T, et al. Genetic Relationship of Body Measurement Traits at Early Age with Carcass Traits in Japanese Black Cattle [J]. Animal Science Journal, 2013, 84(3): 206-212.

[13] NAWAZ H, MUSHTAQ T, YAQOOB M. Effect of Varying Levels of Energy and Protein on Live Performance and Carcass Characteristics of Broiler Chicks [J]. The Journal of Poultry Science, 2006, 43(4): 388-393.

[14] LI M Y, FAN X Y, CHENG Q M, et al. Effect of *Amomum villosum* Essential Oil as an Additive on the Chemical Composition, Fermentation Quality, and Bacterial Community of Paper Mulberry Silage [J]. Frontiers in Microbiology, 2022(13): 951958.

[15] PARK M H, JUNG S, YUK H J, et al. Rapid Identification of Isoprenylated Flavonoids Constituents with Inhibitory Activity on Bacterial Neuraminidase from Root Barks of Paper Mulberry (*Broussonetia papyrifera*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 174: 61-68.

[16] OTEIZA P I, FRAGA C G, MILLS D A, et al. Flavonoids and the Gastrointestinal Tract: Local and Systemic Effects [J]. Molecular Aspects of Medicine, 2018, 61: 41-49.

[17] WIDODO N, WIHANDOYO, ZUPRIZAL, et al. The Effect of Dietary Binahong [*Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis] Leaf Meal Supplementation on Total Ileal Bacteria and Jejunal Histomorphology in Broiler Chickens [J]. International Journal of Poultry Science, 2018, 17(10): 473-478.

[18] LIU B Y, HUAN H L, GU H R, et al. Dynamics of a Microbial Community during Ensiling and Upon Aerobic Exposure in Lactic Acid Bacteria Inoculation-Treated and Untreated Barley Silages [J]. Bioresource Technology, 2019, 273: 212-219.

[19] KIM P, NAM Y J, KIM W J, et al. Edgeworthia Papyrifera Regulates Osteoblast and Osteoclast Differentiation in Vitro and Exhibits Anti-Osteoporosis Activity in Animal Models of Osteoporosis [J]. Planta Medica, 2019, 85(9-10): 766-773.

[20] CHEN S, LIU H J, ZHANG J Q, et al. Dietary Rutin Improves Breast Meat Quality in Heat-Stressed Broilers and Protects Mitochondria from Oxidative Attack via the AMPK/PINK1-Parkin Pathway [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(5): 2367-2377.

[21] ZHOU Q, ZHU J M, LIU B, et al. Effects of High-Dose of Copper Amino Acid Complex on Laying Performance,

- Hematological and Biochemical Parameters, Organ Index, and Histopathology in Laying Hens [J]. Biological Trace Element Research, 2021, 199(8): 3045-3052.
- [22] 连芬, 黄荣富, 范春梅. 血清甲胎蛋白、 α -L-岩藻糖苷酶、碱性磷酸酶、谷氨酰转肽酶、乳酸脱氢酶检测对肝癌的诊断价值 [J]. 中国当代医药, 2023, 30(2): 167-170.
- [23] 张生伟, 王小平, 张展海, 等. 青贮杂交构树对杜湖杂交肉羊生长性能、血清生化指标和肉品质的影响 [J]. 草业学报, 2021, 30(3): 89-99.
- [24] TAO H, SI B W, XU W C, et al. Effect of *Broussonetia papyrifera* L. Silage on Blood Biochemical Parameters, Growth Performance, Meat Amino Acids and Fatty Acids Compositions in Beef Cattle [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2020, 33(5): 732-741.
- [25] 范玥, 黄越川, 马亦珩, 等. 杂交构树青贮对湖羊生长性能和血液指标的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(6): 204-209.
- [26] YAO J, WANG L L, ZHANG W J, et al. Effects of *Bacillus megaterium* on Growth Performance, Serum Biochemical Parameters, Antioxidant Capacity, and Immune Function in Suckling Calves [J]. Open Life Sciences, 2020, 15(1): 1033-1041.
- [27] WANG F F, SU Y L, CHEN N Z, et al. Genome-Wide Analysis of the UGT Gene Family and Identification of Flavonoids in *Broussonetia papyrifera* [J]. Molecules, 2021, 26(11): 3449.
- [28] ABUH S, MAHMOUD A E M, FAYED A M A, et al. The Effect of Exogenous Lysozyme Supplementation on Growth Performance, Caecal Fermentation and Microbiota, and Blood Constituents in Growing Rabbits [J]. Animals, 2022, 12(7): 899.
- [29] MADEJ J P, SKONIECZNA J, SIWEK M, et al. Genotype-Dependent Development of Cellular and Humoral Immunity in the Spleen and Cecal Tonsils of Chickens Stimulated in Ovo with Bioactive Compounds [J]. Poultry Science, 2020, 99(9): 4343-4350.
- [30] WU Q J, ZHENG X C, WANG T, et al. Effects of Dietary Supplementation with Oridonin on the Growth Performance, Relative Organ Weight, Lymphocyte Proliferation, and Cytokine Concentration in Broiler Chickens [J]. BMC Veterinary Research, 2018, 14(1): 34.
- [31] SI B W, TAO H, ZHANG X L, et al. Effect of *Broussonetia papyrifera* L. (Paper Mulberry) Silage on Dry Matter Intake, Milk Composition, Antioxidant Capacity and Milk Fatty Acid Profile in Dairy Cows [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2018, 31(8): 1259-1266.
- [32] IBRAHIM D, KISHAWY A T Y, KHATER S I, et al. Effect of Dietary Modulation of Selenium Form and Level on Performance, Tissue Retention, Quality of Frozen Stored Meat and Gene Expression of Antioxidant Status in Ross Broiler Chickens [J]. Animals; an Open Access Journal from MDPI, 2019, 9(6): 342.
- [33] KHAN M T, NIAZI A S, ARSLAN M, et al. Effects of Selenium Supplementation on the Growth Performance, Slaughter Characteristics, and Blood Biochemistry of Naked Neck Chicken [J]. Poultry Science, 2023, 102(3): 102420.
- [34] SHOJADOOST B, KULKARNI R R, YITBAREK A, et al. Dietary Selenium Supplementation Enhances Antiviral Immunity in Chickens Challenged with Low Pathogenic Avian Influenza Virus Subtype H9N2 [J]. Veterinary Immunology and Immunopathology, 2019, 207: 62-68.
- [35] WANG X K, HU Y F, ZHU X Y, et al. Bacteroides-derived Isovaleric Acid Enhances Mucosal Immunity by Facilitating Intestinal IgA Response in Broilers [J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2023, 14(1): 4.
- [36] RYU H W, PARK M H, KWON O K, et al. Anti-Inflammatory Flavonoids from Root Bark of *Broussonetia papyrifera* in LPS-Stimulated RAW_{264.7} Cells [J]. Bioorganic Chemistry, 2019, 92: 103233.
- [37] 陈松, 冯月荣, 曹淑萍. pH 值对屠宰肉品质的影响 [J]. 肉类工业, 2009(6): 21-23.
- [38] NORTH CUTT J K, FOEGEDING E A, EDENS F W. Water-Holding Properties of Thermally Preconditioned Chicken

Breast and Leg Meat [J]. Poultry Science, 1994, 73(2): 308-316.

[39] ZHANG Y W, LUO H L, CHEN Y, et al. Effects of Liquorice Extract on the pH Value, Temperature, Drip Loss, and Meat Color during Aging of Longissimus Dorsi Muscle in Tan Sheep [J]. Small Ruminant Research, 2013, 113(1): 98-102.

[40] PANG S Q, WANG G Q, LIN J S, et al. Cytotoxic Activity of the Alkaloids from *Broussonetia papyrifera* Fruits [J]. Pharmaceutical Biology, 2014, 52(10): 1315-1319.

[41] MALANÍK M, TREML J, LELÁKOVÁ V, et al. Anti-Inflammatory and Antioxidant Properties of Chemical Constituents of *Broussonetia papyrifera* [J]. Bioorganic Chemistry, 2020, 104: 104298.

[42] PURCHAS R W, BURNHAM D L, MORRIS S T. Effects of Growth Potential and Growth Path on Tenderness of Beef Longissimus Muscle from Bulls and Steers [J]. Journal of Animal Science, 2002, 80(12): 3211-3221.

[43] YANG X F, QIU Y Q, JIANG Z Y. 273 the Effect of Fermented Feed on Meat Quality, Lipid Antioxidant Ability, Lipid and Protein Metabolism in Longissimus Dorsi Muscle of Finishing Pigs [J]. Journal of Animal Science, 2019, 97(3): 103-104.

[44] BRENES A, MARQUARDT R R, GUENTER W, et al. Effect of Enzyme Addition on the Performance and Gastrointestinal Tract Size of Chicks Fed Lupin Seed and Their Fractions [J]. Poultry Science, 2002, 81(5): 670-678.

[45] ALYILEILI S R, EL-TARABILY K A, BELAL I E H, et al. Intestinal Development and Histomorphometry of Broiler Chickens Fed *Trichoderma reesei* Degraded Date Seed Diets [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2020(7): 349.

[46] ANNISON G. Relationship between the Levels of Soluble Nonstarch Polysaccharides and the Apparent Metabolizable Energy of Wheats Assayed in Broiler Chickens [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(7): 1252-1256.

[47] OMAR A E, AL-KHALAIFAH H S, MOHAMED W A M, et al. Effects of Phenolic-Rich Onion (*Allium cepa* L.) Extract on the Growth Performance, Behavior, Intestinal Histology, Amino Acid Digestibility, Antioxidant Activity, and the Immune Status of Broiler Chickens [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2020(7): 582612.

[48] FRANCE M M, TURNER J R. The Mucosal Barrier at a Glance [J]. Journal of Cell Science, 2017, 130(2): 307-314.

[49] LIAO L Y, LI J, LI J, et al. Effects of Astragalus Polysaccharides on Intestinal Morphology and Intestinal Immune Cells of Muscovy Ducklings Infected with Muscovy Duck Reovirus [J]. Poultry Science, 2021, 100(1): 64-72.

[50] ZHAI Z H, DONG W X, SUN Y, et al. Vitamin-Microbiota Crosstalk in Intestinal Inflammation and Carcinogenesis [J]. Nutrients, 2022, 14(16): 3383.

[51] 陶振阳, 张金金, 张邦, 等. 发酵构树饲料对蛋鸡产蛋后期生产性能、蛋品质、血清生化指标和肠道组织形态的影响 [J]. 动物营养学报, 2021, 33(10): 5927-5937.

[52] 李世歌, 熊先勤, 陈光吉, 等. 杂交构树青贮对务川白山羊生长性能、血清生化指标及瘤胃发酵参数的影响 [J]. 饲料研究, 2021, 44(21): 5-9.

[53] 李华丽, 刘莹莹, 朱吉, 等. 构树发酵饲料对湘沙猪肌肉肌苷酸酶、脂肪酶和抗氧化性能的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(S1): 243-246, 252.

责任编辑 周仁惠