

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.05.008

徐兰梦, 袁岩聪, 彭昕, 等. 复合菌制剂对麻羽肉鸡性能和肠道微生物的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 87-98.

复合菌制剂对麻羽肉鸡性能和 肠道微生物的影响

徐兰梦¹, 袁岩聪¹, 彭昕², 张城², 张宏亮¹, 方成伟¹,
万堃¹, 何航³, 张传师³, 刘安芳¹, 章杰¹

1. 西南大学 动物科学技术学院, 重庆 荣昌 402460; 2. 武汉新宏珉生物科技有限公司, 武汉 430070;

3. 重庆三峡职业学院 动物科技学院, 重庆 万州 404155

摘要: 研究饲料中添加不同水平复合菌制剂对麻羽肉鸡血清代谢、生长、消化、免疫性能和肠道微生物的影响, 选取 240 只体况健康的 1 日龄麻羽肉鸡(公、母鸡比例为 1:1), 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), 0.05%, 0.1% 和 0.2% 的复合菌制剂, 试验期共 90 d. 结果表明: 与对照相比, 0.1% 复合菌制剂组显著提高了麻羽肉鸡平均日增质量、采食量、胸腺、法氏囊、胰腺、空肠、回肠器官指数以及血清总蛋白、高密度脂蛋白、免疫球蛋白 G(IgG)和溶菌酶水平($p < 0.05$), 显著降低了血清碱性磷酸酶活性($p < 0.05$); 0.05% 和 0.2% 复合菌制剂组显著降低了血清谷草转氨酶活性($p < 0.05$); 不同水平复合菌制剂均显著提高了钙和磷消化率, 0.1% 复合菌制剂组显著提高了肠道绒毛高度和黏膜厚度($p < 0.05$). 回归分析显示回肠绒毛高度、IgG 和甘油三酯水平与复合菌制剂添加量呈显著二项式关系($p \leq 0.05$), 且 0.1% 复合菌制剂组达到最优. 此外, 复合菌制剂显著改变了麻羽肉鸡盲肠微生物的 β 多样性($p < 0.05$), 门水平上, 主要由拟杆菌门(Bacteroidetes), 厚壁菌门(Firmicutes), 变形杆菌门(Proteobacteria)组成; 属水平上, 相对丰度占比超过 1% 的共有菌有 *Bacteroides*, *Mucispirillum*, *Desulfovibrio* 等 6 种; 0.2% 复合菌制剂组显著提高了疣微菌门(Verrucomicrobia)和帕拉普氏菌属(*Paraprevotella*)的相对丰度($p < 0.05$), 显著降低了普拉梭菌属(*Faecalibacterium*)的相对丰度($p < 0.05$). 复合菌制剂可不同程度地改善麻羽肉鸡血清代谢、生长、消化和免疫性能, 并对肠道菌群结构产生影响, 其中 0.1% 为适宜添加量.

关键词: 复合菌; 麻羽肉鸡; 生长; 消化; 免疫; 肠道微生物

中图分类号: S831.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)05-0087-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Compound Bacterial Preparation on Performance and Gut Microbiota of Mayu Broilers

收稿日期: 2023-01-07

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-ZXX0038); 重庆市教委科学研究项目(KJQN202103507).

作者简介: 徐兰梦, 硕士研究生, 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.

XU Lanmeng¹, YUAN Yancong¹, PENG Xin², ZHANG Cheng²,
ZHANG Hongliang¹, FANG Chengwei¹, WAN Kun¹,
HE Hang³, ZHANG Chuanshi³, LIU Anfang¹, ZHANG Jie¹

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

2. Wuhan Xinhongji Biotechnology Co. Ltd, Wuhan 430070, China;

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

Abstract: The aim of this study was to explore the effects of adding different levels of compound bacterial preparations in the diet on serum biochemistry, growth, digestion, immune performance and gut microbiota of *Mayu* broilers. A total of 240 healthy 1-day-old *Mayu* broilers were randomly divided into 4 groups with 6 replicates in each group, and 10 broilers in each replicate. In the basal diet, 0 (control), 0.05%, 0.1% and 0.2% of the compound bacterial preparation were added, respectively. The results showed that compared with the control group, the supplementation of 0.1% compound bacterial preparation significantly increased the average daily gain, feed intake, thymus, bursa, pancreas, jejunum and ileum index, and the content of serum total protein, high density lipoprotein, IgG, lysozyme of *Mayu* broilers ($p < 0.05$), while the serum alkaline phosphatase activity was significantly reduced ($p < 0.05$). The 0.05% and 0.2% of compound bacterial preparations significantly reduced the serum aspartate aminotransferase activity ($p < 0.05$). Different levels of compound bacterial preparations significantly improved the digestibility of Ca, P and 0.1% of compound bacterial preparations significantly increased the gut villi height and mucosal thickness ($p < 0.05$). Regression analysis showed that ileal villus height, IgG and triglyceride content had a significant quadratic relationship with the content of the ($p \leq 0.05$), with the highest level in 0.1% of compound bacterial preparation. In addition, the compound bacterial preparations significantly changed the β -diversity of gut microbiota in *Mayu* broilers ($p < 0.05$). At the phylum level, it was mainly composed of Bacteroidetes, Firmicutes and Proteobacteria. At the genus level, there were six common bacteria, including *Bacteroides*, *Mucispirillum* and *Desulfovibrio* etc, with relative abundance higher than 1%. The 0.2% compound bacterial preparation significantly increased the relative abundance of *Verucomicrobia* and *Paraprevotella* ($p < 0.05$), while it significantly decreased *Faecalibacterium* ($p < 0.05$). The results indicate the compound bacteria preparation could improve the serum metabolism, growth, digestion and immune performance of *Mayu* broilers to varying degrees. It also had an impact on the structure of gut microbiota, of which 0.1% was the appropriate addition level.

Key words: compound bacteria; *Mayu* broiler; growth; digestion; immunity; gut microbiota

抗生素能促进畜禽生长和预防疾病,但长期使用可能会导致耐药性的产生,其滥用还会引起肠道菌群失衡、免疫和生产性能下降、环境污染等,因此,绿色、安全和可持续的抗生素替代品应运而生,对减少抗生素使用 and 环境污染至关重要^[1].

益生菌是一种有益于宿主的活性微生物,通过改善肠道微生物组成、加强肠道上皮屏障功能、调节免疫系统、对黏膜和上皮的竞争性黏附等机制影响宿主胃肠道功能,从而改善畜禽健康和提高生产力^[2-4]. 研究指出,粪肠球菌可改善哺乳母猪表观消化率,增加其仔猪出生质量、平均日增质量和料质量比,并且还能提高肉鸡饲料转化率^[5-7]. 乳酸杆菌可增加断奶仔猪肠道微生物多样性和丰富度,减弱回肠炎症基因表达,促进肠道发育^[8]. 枯草芽孢杆菌能提高仔猪回肠甘油三酯、脂肪酶、淀粉酶含量和绒毛隐比,还能在瘤胃中建立有益菌群,提高小牛断奶后的饲料利用率,并减少甲烷的产生^[9-10]. 双歧杆菌可增加肉鸡血清超氧化物歧化酶和免疫球蛋白含量,改善抗氧化状态和免疫应答^[11]. 丁酸梭菌有利于改善肉鸡的胫骨发育和对钙、磷的吸收利用^[12]. 屎肠球菌可改善肉鸡肠道菌群结构,提高短链脂肪酸产

生菌的相对丰度, 促进肠道的磷吸收和骨形成代谢活动^[13]. 嗜酸乳杆菌液则可显著降低蛋鸡残破蛋比例以及血清和蛋黄胆固醇含量^[14].

以上研究表明单一益生菌对畜禽动物有积极作用, 而多种益生菌组合能更有效地发挥相互之间的协同作用, 在肠道健康和生产性能之间创造更有利的平衡^[3, 15], 可更大限度地发挥益生菌的优势, 且已在畜禽生产中得到了广泛应用^[16]. Liu 等^[17]研究显示与单一粪肠球菌相比, 干酪乳杆菌和粪肠球菌的复合菌能显著提高仔猪 IgG 含量, 并降低死亡率和 7 日龄腹泻率. Yu 等^[18]研究指出与单一丁梭状芽孢杆菌或枯草芽孢杆菌相比, 二者的复合菌显著提高了扬州鹅空肠黏膜 T-SOD 含量和回肠绒毛高度. Lema 等^[19]研究也表明 *L. acidophilus* 和 *S. faecium* 的复合菌与其单一菌比较, 复合菌能显著改善羔羊平均日增质量和料质量比, 且显著降低粪便中出血性大肠杆菌数量.

麻羽肉鸡是中国特有的肉鸡品种, 具有肉质细嫩、营养价值高、适应性强、生长速度快、抗病性强等特点, 深受广大消费者的喜爱. 本试验探讨了饲料中添加不同水平复合菌制剂对麻羽肉鸡血清代谢、生长、消化、免疫性能和肠道微生物的影响, 旨在为复合菌制剂在麻羽肉鸡上的应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

复合菌制剂主要由粪肠球菌($\geq 50.0 \times 10^8$ CFU/g), 丁酸梭菌($\geq 2.0 \times 10^8$ CFU/g), 屎肠球菌($\geq 0.1 \times 10^8$ CFU/g)和嗜酸乳杆菌($\geq 1.0 \times 10^8$ CFU/g)组成.

选取 240 只体况健康的 1 日龄麻羽肉鸡(公、母鸡比例为 1:1), 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), 0.05%, 0.1% 和 0.2% 的复合菌制剂. 所有试验肉鸡在同一环境下采用 3 层立笼式饲养, 自由采食和饮水, 饲养作息、免疫、卫生消毒等程序按照标准养殖制度执行, 试验期共 90 d. 参照美国国家科学院(1994)制定的鸡的营养需要标准配制基础饲料, 其组成及营养水平如表 1.

表 1 基础饲料组成及营养水平(风干基础)

项目	0~35 d	36~90 d
原料/%		
玉米	65.32	64.65
大豆粕	22.00	20.00
全脂大豆	7.00	7.00
鱼粉	1.40	2.50
肉骨粉	1.28	2.50
石粉	1.15	1.50
磷酸氢钙	1.00	1.00
食盐	0.35	0.35
DL-蛋氨酸	0.15	0.15
赖氨酸	0.10	0.10
预混料	0.25	0.25
合计	100	100
营养水平		
代谢能/(MJ·kg ⁻¹)	12.14	12.33
粗蛋白/%	20.83	18.55
钙/%	0.99	0.88
总磷/%	0.71	0.67
赖氨酸/%	1.11	0.94
蛋氨酸/%	0.36	0.32

注: 预混料为每千克饲料提供: 维生素 A 4 600 IU, 维生素 D₃ 2 200 IU, 维生素 E 30 IU, 维生素 B₁ 6 mg, 维生素 B₂ 8 mg, 维生素 B₆ 5 mg, 维生素 B₁₂ 14 μg, 烟酸 32 mg, 泛酸 25 mg, 叶酸 0.6 mg, 生物素 0.25 mg, 氯化胆碱 50 g, Fe 50 g, Zn 60 mg, Cu 8 mg, Mn 50 mg, Se 0.3 mg, I 0.5 mg; 代谢能为计算值.

1.2 样品采集

试验结束前 4 d, 每个重复随机选取 3 只麻羽肉鸡饲养于代谢笼, 采用全收粪法连续收集 3 d 粪便. 试验结束后, 每个重复选取 4 只接近本栏平均质量的鸡, 称质量后使用真空采血管(不含抗凝剂)采集颈静脉血 10 mL, 静置 20 min 后 3 500 r/min 离心 10 min 后取上清液, -20 ℃下保存备用; 屠宰后迅速分离出肝脏、胰腺、肌胃、腺胃、脾脏、胸腺、法氏囊、十二指肠、空肠和回肠, 并轻轻挤出十二指肠、空肠和回肠内容物, 生理盐水冲洗干净, 滤纸吸干水分; 取盲肠内容物并汇合成 1 个样品 -80 ℃冻存于无菌管中.

1.3 指标测定

1.3.1 生长性能

参照 NY/T 823-2020《家禽生产性能名词术语和度量计算方法》^[20]测定生长性能, 即每天早上喂料前记录耗料量, 试验开始和结束当天早上对每只鸡空腹称质量, 计算平均日采食量、平均日增质量和料质量比.

1.3.2 血清指标

利用全自动血液生化分析仪(OTA-400)测定血清总蛋白、总胆固醇、甘油三酯、高(低)密度脂蛋白、谷丙转氨酶、谷草转氨酶、碱性磷酸酶和肌酸激酶的含量; 以溶酶小球菌体细胞为底物, 采用比浊法测定溶菌酶活性; 使用单克隆抗体免疫比浊法测定免疫球蛋白 A(IgA)、免疫球蛋白 G(IgG)和免疫球蛋白 M(IgM)活性.

1.3.3 器官指数

称取肝脏、胰腺、肌胃(去除肌内金)、腺胃、脾脏、胸腺、法氏囊、十二指肠、空肠和回肠质量后, 计算器官指数(I):

$$I = m_1 / m_2 \times 100\%$$

式中: m_1 为器官鲜质量; m_2 为活体质量.

1.3.4 消化代谢

记录代谢笼每只鸡的采食量, 清除所收集粪便中的羽毛等杂物后称质量, 并按照每 100 g 粪样 5 mL 加入 10% 硫酸固氮. 将饲料原料、剩料和粪便于 65 ℃烘干 48 h, 回潮 24 h 称质量, 粉碎机过 40 目筛并充分混匀后待测. 总能量(GE)采用燃烧法(德国 IKA2000 全自动氧弹测定仪)测定; 粗蛋白采用凯氏定氮法(GB/T 6432-2018)测定; 钙(Ca)采用 EDTA 络合滴定法(GB/T 6436-2018)测定; 磷(P)采用分光光度法(GB/T 6437-2018)测定.

1.3.5 肠道形态

采集十二指肠、空肠和回肠各肠段约 5 cm, Tris 缓冲盐水冲洗肠段, 4% 多聚甲醛固定, 石蜡包埋, 切成 5 μ m 薄片, 苏木精 & 伊红(H&E)染色, 然后在 22 倍放大镜下拍照; 采用 Image Pro Plus 6.0 测量绒毛高度、隐窝深度和黏膜厚度. 每个样品测 3 个重复值, 并计算绒毛隐比.

1.3.6 肠道微生物

利用 QIAamp DNA Stool Mini Kit(QIAGEN, 德国)提取盲肠微生物总 DNA, 扩增 16S rRNA V3-V4 区(338F: 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3', 5'端带条形码标记; 806R: 5'-GGACTACHVGGGT-WTCTAAT-3'). PCR 扩增产物用 QuantiFluorTM-ST 蓝色荧光定量系统检测, 根据测序量要求按比例混合构建文库进行 Miseq 测序. 对双端序列数据进行拼接、筛选、质控、过滤等一系列处理后, 在 97% 相似度下利用 Usearch 7.1 对序列聚类, 得到分类操作单元(OTUs), 然后用 RDP Classifier 将 OTUs 代表序列与数据库 Silva 进行比对(置信度阈值为 0.6).

1.4 数据分析

α 多样性以物种丰富度指数(Chao1 和 ACE)和多样性指数(Shannon 和 Simpson)表示; β 多样性通过偏最小二乘回归分析法(PLS-DA)进行可视化, 并通过计算非加权 UniFrac 距离矩阵制作组间差异盒状图.

使用 SPSS 22.0 软件进行方差分析, 如存在统计学意义, 用 Duncan 法进行多重比较. 使用线性 and 二项式回归分析评估复合菌制剂添加水平的影响, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示, $p < 0.05$ 为差异有统计学意义.

2 结果与分析

2.1 生长性能

由表 2 可知, 与对照相比, 添加复合菌显著提高了麻羽肉鸡末质量($p < 0.05$), 且 0.05% 和 0.1% 复合菌制剂组显著提高了麻羽肉鸡平均日增质量($p < 0.05$), 而 0.1% 复合菌制剂组又显著高于 0.05% 复合菌制剂组($p < 0.05$); 同时, 0.1% 复合菌制剂组显著提高了麻羽肉鸡的采食量($p < 0.05$).

表 2 复合菌制剂对麻羽肉鸡生长性能的影响

项目	组别				p 值	
	对照	0.05%	0.1%	0.2%	线性	二项式
始质量/g	32.39±1.09a	32.11±1.13a	32.83±0.92a	32.39±1.14a	0.79	0.90
末质量/g	2 352.11±11.07d	2 370.94±13.32b	2 409.28±39.07a	2 354.44±14.69c	0.96	0.40
平均日增质量/g	28.99±0.14c	29.23±0.16b	29.71±0.49a	29.03±0.19c	0.94	0.39
采食量/g	6 756.00±76.73c	6 850.00±39.00c	6 991.00±53.33ab	6 860.00±69.86bc	0.55	0.32
料质量比	2.87±0.04a	2.89±0.02a	2.90±0.01a	2.91±0.03a	0.06	0.06

注: 小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义.

2.2 血清代谢

由表 3 可知, 与对照相比, 0.05% 和 0.2% 复合菌制剂组显著降低了麻羽肉鸡谷草转氨酶活性($p < 0.05$), 而总蛋白和高密度脂蛋白质量浓度在 0.1% 复合菌制剂组显著升高($p < 0.05$), 碱性磷酸酶活性在 0.1% 复合菌制剂组显著降低($p < 0.05$). 此外, 随复合菌制剂量的增加, 甘油三酯质量浓度呈显著的二项式升高趋势($p = 0.04$), 且 0.1% 复合菌制剂组质量浓度达到最高.

表 3 复合菌制剂对麻羽肉鸡血清代谢指标的影响

项目	组别				p 值	
	对照	0.05%	0.1%	0.2%	线性	二项式
谷丙转氨酶/(U·L ⁻¹)	5.67±0.33a	4.55±0.29a	4.33±0.33a	4.43±0.30a	0.28	0.19
谷草转氨酶/(U·L ⁻¹)	224.73±10.15a	190.12±3.12b	208.33±17.17ab	194.55±7.3b	0.42	0.74
碱性磷酸酶/(U·L ⁻¹)	1 234.09±46.07a	1 179.78±38.17a	872.30±108.34b	1 314.22±39.32a	0.87	0.52
总蛋白/(g·L ⁻¹)	37.63±2.58b	35.03±1.93b	45.93±3.3a	38.90±3.36ab	0.71	0.82
总胆固醇/(mmol·L ⁻¹)	2.99±0.22a	3.02±0.10a	3.06±0.12a	2.74±0.29a	0.23	0.16
甘油三酯/(mmol·L ⁻¹)	0.52±0.06a	0.60±0.03a	0.70±0.05a	0.62±0.08a	0.56	0.04
高密度脂蛋白/(mmol·L ⁻¹)	2.63±0.42b	2.76±0.37ab	3.42±0.28a	3.07±0.15ab	0.40	0.51
低密度脂蛋白/(mmol·L ⁻¹)	0.38±0.04a	0.39±0.04a	0.42±0.03a	0.39±0.02a	0.72	0.48
肌酸激酶/(U·L ⁻¹)	3 287.33±192.26a	3 285.47±525.77a	3 170.62±266.99a	3 405.64±462.23a	0.52	0.46

注: 小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义.

2.3 消化性能

由表 4 可知, 与对照相比, 0.1% 复合菌制剂组显著提高了麻羽肉鸡胰腺、空肠和回肠指数($p < 0.05$), 而 0.05% 和 0.2% 复合菌制剂组差异无统计学意义($p > 0.05$); 复合菌制剂组均显著提高了麻羽肉鸡钙和磷消化率($p < 0.05$), 其中 0.1% 和 0.2% 复合菌制剂组之间差异无统计学意义($p > 0.05$). 此外, 随复合菌制剂量的增加, 粗蛋白消化率呈显著升高的趋势(线性: $p = 0.05$; 二项式: $p = 0.02$), 且 0.2% 复合菌制剂组消化率达到最高.

表 4 复合菌制剂对麻羽肉鸡消化性能的影响

项目	组别				<i>p</i> 值	
	对照	0.05%	0.1%	0.2%	线性	二项式
肝脏指数	2.37±0.33a	2.38±0.21a	2.48±0.21a	2.13±0.34a	0.32	0.30
胰腺指数	0.21±0.03b	0.23±0.03ab	0.27±0.03a	0.23±0.02b	0.65	0.39
肌胃指数	1.73±0.24a	1.75±0.12a	1.77±0.07a	1.71±0.17a	0.62	0.21
腺胃指数	0.47±0.06a	0.48±0.07a	0.50±0.05a	0.49±0.09a	0.32	0.34
十二指肠指数	0.60±0.12a	0.65±0.04a	0.63±0.09a	0.49±0.05a	0.24	0.08
空肠指数	1.26±0.04b	1.29±0.03ab	1.40±0.02a	1.26±0.02b	0.96	0.49
回肠指数	1.03±0.05b	1.05±0.04b	1.22±0.01a	0.98±0.04b	0.85	0.54
钙消化率/%	23.26±0.5c	28.98±0.13b	30.49±0.29a	29.77±0.92ab	0.28	0.15
磷消化率/%	33.8±1.79c	36.73±0.82b	37.87±0.51ab	38.25±0.77a	0.14	0.09
粗蛋白消化率/%	57.91±0.78a	58.16±0.49a	58.35±0.37a	58.90±1.01a	0.05	0.02
总能量消化率/%	74.53±1.8a	74.86±1.77a	74.48±0.54a	74.1±0.24a	0.23	0.44

注：小写字母不同表示 $p<0.05$ ，差异有统计学意义。

2.4 肠道形态

由表 5 可知，与对照相比，0.05%复合菌制剂组显著提高了空肠和回肠绒毛高度、隐窝深度和黏膜厚度($p<0.05$)，但显著降低了绒隐比($p<0.05$)；0.1%复合菌制剂组显著提高了绒毛高度和黏膜厚度($p<0.05$)；0.2%复合菌制剂组显著降低了绒毛高度和黏膜厚度($p<0.05$)。此外，随复合菌制剂量的增加，回肠绒毛高度呈显著的二项式升高趋势($p<0.05$)，且 0.1%复合菌制剂组达到最高。

表 5 复合菌制剂对麻羽肉鸡肠道形态的影响

项目		组别				<i>p</i> 值	
		对照	0.05%	0.1%	0.2%	线性	二项式
十二指肠	绒毛高度/ μm	1 314.78±78.85b	1 141.01±60.97c	1 648.70±29.09a	1 007.35±38.97d	0.66	0.73
	隐窝深度/ μm	202.02±28.10b	452.12±39.89a	157.57±11.39c	231.65±19.54b	0.80	0.96
	绒隐比	6.63±1.06b	2.54±0.30d	10.51±0.74a	4.38±0.44c	0.94	0.93
	黏膜厚度/ μm	1 548.65±59.79b	1 604.38±83.57b	1 815.62±20.57a	1 258.03±31.98c	0.47	0.35
空肠	绒毛高度/ μm	1 387.78±46.08c	1 599.10±14.41b	1 723.65±38.68a	829.28±42.39d	0.34	0.12
	隐窝深度/ μm	253.97±47.60b	454.41±25.62a	274.08±13.16b	163.49±22.63c	0.44	0.63
	绒隐比	5.62±0.95ab	3.53±0.22c	6.31±0.39a	5.19±1.00b	0.87	0.99
	黏膜厚度/ μm	1 664.01±83.17c	2 071.49±23.22a	1 986.51±24.49b	980.40±37.29d	0.31	0.07
回肠	绒毛高度/ μm	1 156.72±52.89b	1 270.21±45.90a	1 276.85±20.38a	1 033.01±43.19c	0.43	0.03
	隐窝深度/ μm	205.33±28.86b	273.17±21.98a	184.62±20.94b	150.05±15.01c	0.32	0.65
	绒隐比	5.73±1.01b	4.67±0.39c	7.00±0.86a	6.96±0.87a	0.32	0.73
	黏膜厚度/ μm	1 384.28±37.02c	1 551.35±33.09a	1 487.20±29.84b	1 174.78±36.01d	0.32	0.17

注：小写字母不同表示 $p<0.05$ ，差异有统计学意义。

2.5 免疫球蛋白及器官指数

由表 6 可知，与对照相比，0.1%复合菌制剂组显著提高了麻羽肉鸡胸腺和法氏囊指数($p<0.05$)，而 0.05%和 0.2%复合菌制剂组间差异无统计学意义($p>0.05$)；同时，0.1%复合菌制剂组显著提高了 IgG 和溶菌酶质量浓度($p<0.05$)，而 0.2%复合菌制剂组差异无统计学意义($p>0.05$)。此外，随复合菌制剂量的增加，IgG 质量浓度呈显著的二项式升高趋势($p=0.05$)，且 0.1%复合菌制剂组最高。

表 6 复合菌制剂对麻羽肉鸡免疫性能的影响

项目	组别				p 值	
	对照	0.05%	0.1%	0.2%	线性	二项式
脾脏指数/%	0.19±0.02a	0.23±0.02a	0.23±0.01a	0.18±0.04a	0.68	0.15
胸腺指数/%	0.14±0.01b	0.15±0.01b	0.21±0.01a	0.16±0.03b	0.65	0.57
法氏囊指数/%	0.08±0.01b	0.11±0.01b	0.14±0.01a	0.09±0.01b	0.89	0.23
IgA/(g·L ⁻¹)	0.58±0.01a	0.58±0.02a	0.58±0.01a	0.56±0.02a	0.12	0.11
IgM/(g·L ⁻¹)	1.82±0.04a	1.90±0.09a	1.87±0.05a	1.89±0.02a	0.40	0.63
IgG/(g·L ⁻¹)	2.01±0.20c	2.31±0.20ab	2.40±0.10a	2.11±0.10bc	0.89	0.05
溶菌酶/(μg·mL ⁻¹)	8.58±0.54b	9.60±0.84ab	12.01±0.58a	8.95±0.47b	0.43	0.88

注: 小写字母不同表示 $p<0.05$, 差异有统计学意义.

2.6 肠道微生物

不同水平复合菌制剂饲喂麻羽肉鸡的肠道微生物测序序列文库覆盖率均大于 97.48%, 比对后共得到 939 个 OTUs(对照为 810 个, 0.05%为 786 个, 0.1%为 769 个, 0.2%为 776 个), 其中共享 615 个(图 1a). α 多样性分析表明, 添加不同水平复合菌制剂对麻羽肉鸡肠道微生物丰富度和多样性影响无统计学意义($p>0.05$, 图 1b). 分类学结果显示: 对照有 16 门 112 属, 0.05%复合菌制剂组有 14 门 93 属, 0.1%复合菌制剂组有 15 门 93 属, 0.2%复合菌制剂组有 15 门 93 属. 门水平上, 主要由拟杆菌门(Bacteroidetes)(对照: 51.62%; 0.05%: 54.50%; 0.1%: 57.51%; 0.2%: 47.41%), 厚壁菌门(Firmicutes)(对照: 24.80%; 0.05%: 21.00%; 0.1%: 21.27%; 0.2%: 19.58%), 变形杆菌门(Proteobacteria)(对照: 14.55%; 0.05%: 12.25%; 0.1%: 9.01%; 0.2%: 20.71%)等组成; 属水平上, 相对丰度占比 1%以上的共有菌有 *Bacteroides*, *Mucispirillum*, *Desulfovibrio*, *Cloacibacillus*, *Prevotella* 和 *Paraprevotella* (图 1c). β 多样性分析显示肠道微生物菌群结构根据复合菌制剂水平发生明显聚类, 且组间差异有统计学意义($p=0.02$, 图 1d). 此外, 关键菌群的差异分析显示 0.2%复合菌制剂组显著提高了疣微菌门(Verrucomicrobia)和帕拉普氏菌属(*Paraprevotella*)的相对丰度($p<0.05$), 而复合菌制剂组则显著降低了普拉梭菌属(*Faecalibacterium*)的相对丰度(图 1e).

3 讨论

3.1 复合菌制剂对麻羽肉鸡生长性能、血清生化指标的影响

本研究结果表明, 0.05%和 0.1%复合菌制剂组显著提高了麻羽肉鸡平均日增质量, 适量的复合菌能促进麻羽肉鸡的生长. 复合菌制剂主要由粪肠球菌、屎肠球菌、嗜酸乳杆菌和丁酸梭菌构成, 前三者均属于乳酸菌, 能诱导盲肠中乙酸、丁酸等短链脂肪酸(SCFA)的产生, 而丁酸梭菌的代谢产物即为丁酸. SCFA 既是宿主的能量来源, 还能增强上皮细胞的屏障功能, 调节黏蛋白并促进脂肪基因表达, 加强脂肪沉积, 进而提高生长性能^[21-23]. 盲肠的 SCFA 含量升高则会降低其 pH 值, 改善肠道蠕动和消化酶分泌, 促进饲料消化和营养物质吸收. 此外, 前人研究也证实无论是单一的粪肠球菌、丁酸梭菌、屎肠球菌、嗜酸乳杆菌还是其复合菌均能不同程度地改善家禽生长性能, 且复合菌效果更好^[24-25], 表明复合菌之间存在一定的协同黏附作用, 对构建良好的肠道菌群体系有积极作用, 可为有益菌群的定植提供有利条件来促进肠道健康^[3]. 0.2%复合菌制剂组则没有体现出对生长性能有更好的效果, 主要原因可能是 0.2%复合菌制剂组降低了肠道绒毛高度、绒隐比和黏膜厚度, 影响了麻羽肉鸡对营养物质的消化与吸收.

谷草转氨酶反映肝脏的组织渗透性, 是评价肝损伤的重要指标^[26-27]. 本研究中, 复合菌制剂的添加降低了麻羽肉鸡血清中谷草转氨酶的活性, 表明复合菌制剂改善了麻羽肉鸡肝功能, 主要得益于丁酸梭菌可激活肝脏受体信号通路, 促进淋巴细胞发育和分化, 降低促炎症相关基因的表达, 并增加抗炎症和抗氧化

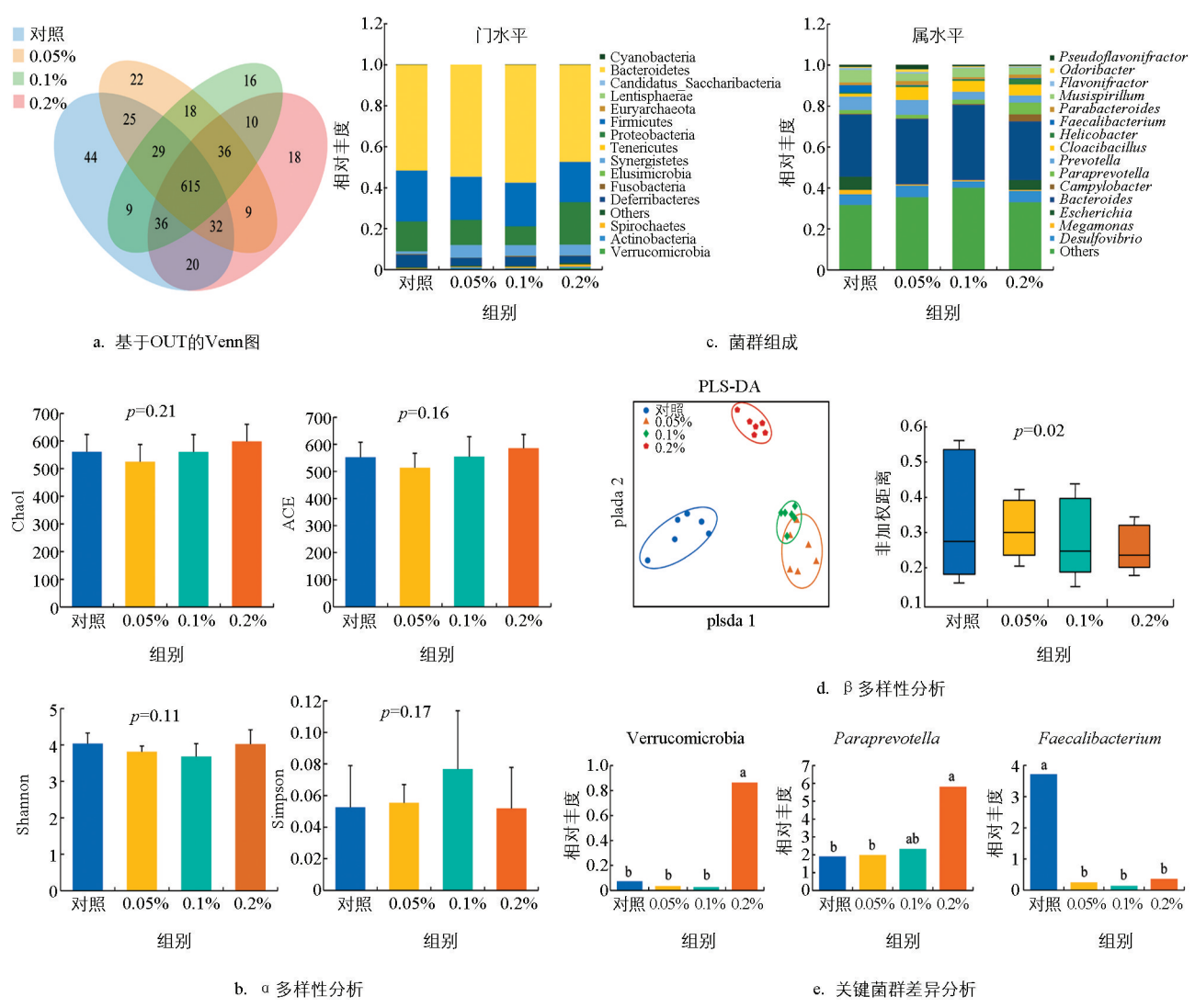


图 1 复合菌制剂对麻羽肉鸡肠道微生物的影响

相关基因的表达^[28]。Xia 等^[29]研究显示嗜黏杆菌可促进 SCFA 合成，减轻肝脏的氧化应激和炎症来降低对肝的损伤。Chen 等^[26]研究则指出复合菌(*Lactobacillus agilis*, *Lactobacillus reuteri*)对 AA 肉鸡血清谷丙转氨酶无影响，说明不同复合菌组成及添加水平具有不同影响，应该谨慎比较不同的研究结果。此外，0.1%复合菌制剂组显著降低了血清碱性磷酸酶的活性，显著提高了高密度脂蛋白含量，其含量高低反映了机体的健康状态，比如碱性磷酸酶是肝和骨骼相关疾病的重要血清指标^[30]，而高密度脂蛋白具有保护心血管的作用^[31]，因此适量的复合菌对麻羽肉鸡健康有积极影响。其可能原因是复合菌所含乳酸菌的抗氧化作用可缓解肠细胞的氧化应激和炎症，使高密度脂蛋白颗粒具有更高的生物质量，有助于改善其在机体内的新陈代谢。适量的复合菌在促进蛋白质吸收、代谢和沉积方面也具有积极作用。本研究中 0.1%复合菌制剂组显著提高了血清总蛋白的含量。复合菌能刺激机体产生更多的蛋白酶，提高饲料蛋白质分解成氨基酸的速率，增强氨基酸间的相互竞争，进而促进机体对氨基酸的利用并加速蛋白质的合成。复合菌制剂的添加对甘油三酯含量影响无统计学意义，但其含量则与复合菌制剂水平呈显著的二项式关系，且 0.1%复合菌制剂组达到最高，进一步表明麻羽肉鸡在 0.1%复合菌制剂饲喂后脂肪沉积能力最强。

3.2 复合菌制剂对麻羽肉鸡消化性能的影响

消化器官的生长发育指数在一定程度上能反映机体的消化性能和健康状况^[32]。本研究中，0.1%复合菌制剂组提高了麻羽肉鸡胰腺、空肠和回肠指数，且改善了肠道绒毛高度、绒隐比和黏膜厚度。这与

Salim 等^[33]研究结果相似,复合菌(*L. reuteri*, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces cerevisiae*)显著提高了白羽肉鸡回肠绒毛高度和黏膜厚度。此外,二项式回归分析也表明复合菌制剂量与回肠绒毛高度呈显著相关关系,且 0.1%复合菌制剂组达到最高。肠道绒毛高度升高意味着管腔与营养物质接触面积增加,提升了肠道对营养物质的消化吸收能力,反过来良好的营养供给促使消化器官及肠道形态发育更好^[34]。此外,随着复合菌制剂有益微生物群落在肠道内大量繁殖,其合成维生素、氨基酸等被小肠吸收后也能促进肠道形态的发育,然而,0.2%复合菌制剂组则显著降低了绒毛高度和黏膜厚度,表明适量复合菌制剂对麻羽肉鸡肠道形态发育有积极作用,过量则抑制其发育。较高水平复合菌制剂进入肠道后致使复合菌数量占据绝对优势,为了自身生长和繁殖将会优先利用肠上皮细胞营养物质,使肠道吸收营养物质效率降低,进而影响其发育。

本研究中,复合菌制剂显著提高了麻羽肉鸡钙和磷的消化率,可能是复合菌通过竞争体内的营养物质、附着位点等方式抑制了病原菌在肠道内的生长和繁殖;同时,复合菌制剂通过肠道微生物影响胆汁酸的合成,维生素 D 则要与胆汁酸结合生成胆盐后才能被肠道吸收,维生素 D 能促进钙和磷的消化吸收^[35]。Capcarova 等^[25]研究也指出屎肠球菌能显著增加肉鸡对钙的吸收。

3.3 复合菌制剂对麻羽肉鸡免疫性能的影响

免疫器官指数反映了免疫器官的发育情况,其大小代表免疫系统成熟度与免疫功能强弱,是目前利用器官质量评判机体免疫性能的常用方法之一。胸腺是细胞免疫的中枢器官,法氏囊则是禽类特有的体液免疫器官。本研究中,0.1%复合菌制剂组提高了麻羽肉鸡胸腺和法氏囊指数,表明适量的复合菌能促进麻羽肉鸡免疫器官的发育,可能是由于复合菌作为外源性抗原物质刺激了胸腺和法氏囊的发育。Biswas 等^[36]研究也指出复合菌(*Bacillus coagulans*, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces boulardi*)显著提高了肉鸡脾脏和胸腺器官指数。

免疫球蛋白是介导体液免疫的主要抗体,其水平高低可在一定程度上反映机体对疾病的抵抗能力^[37]。本研究中,随复合菌制剂量的增加,IgG 质量浓度呈显著的二项式升高趋势,且 0.1%复合菌制剂组最高。Salim 等^[33]研究也指出复合菌显著提升了肉鸡 IgG 质量浓度。复合菌制剂作为非特异性免疫调节因子通过提高肠道黏膜和血清 IgG 质量浓度增强体液免疫。IgG 是血液和细胞外液的主要抗体,可结合病毒、细菌和真菌等病原体来保护机体,进而提高免疫力和抗病力^[8]。此外,0.1%复合菌制剂组显著提高了溶菌酶质量浓度,其原因是本研究所用的革兰氏阳性菌所包含的肽聚糖、脂多糖和脂磷壁酸是免疫系统的激活剂,能促进 T 细胞和淋巴细胞的增殖和成熟,提高吞噬细胞、自然杀伤细胞等活性,进而刺激溶菌酶的产生^[38-39]。研究已证实益生菌可通过附着在肠上皮细胞上刺激增强肠细胞介导的黏膜免疫和完整性,发挥非免疫性保护作用直接阻断肠道致病微生物^[40-42]。

3.4 复合菌制剂对麻羽肉鸡肠道微生物的影响

肠道微生物被认为是宿主的第二大器官,经过长期的协同进化与宿主形成了互利互惠的共生关系。本研究中,复合菌制剂对麻羽肉鸡肠道微生物 α 多样性影响无统计学意义,但显著影响 β 多样性,表明复合菌制剂不会影响麻羽肉鸡肠道菌群种类,仅影响菌群结构,保证了麻羽肉鸡在长期进化过程中形成的菌群稳定性。此外,聚类分析显示 0.05%和 0.1%复合菌制剂组的肠道菌群距离较近甚至部分交叉,说明两者对菌群结构的影响相近。

肠道菌群组成上来看,所有处理的厚壁菌、拟杆菌和变形杆菌门的相对丰度共占麻羽肉鸡肠道菌群的 90%以上,这与前人在蛋鸡上的研究结果类似^[43],其中,0.1%复合菌制剂组的拟杆菌门相对丰度最高,而 0.05%和 0.1%复合菌制剂组的变形杆菌门相对丰度较低。拟杆菌对消化复杂碳水化合物、免疫系统发育和维持肠道微生态平衡具有积极作用,表明麻羽肉鸡消化、免疫性能和肠道菌群稳定性的提高得益于适量复合菌制剂的添加引起有益拟杆菌的增殖。变形杆菌包含多种致病菌,通过其黏附性和侵袭性改变肠道菌群,影响宿主免疫功能,诱导炎症反应产生炎症性肠炎,表明适量复合菌在一定程度上可通过抑制有害变

形杆菌的增殖来预防肠道炎症。此外, 0.2% 复合菌制剂组显著提高了 *Verrucomicrobia* 和 *Paraprevotella* 的相对丰度。 *Verrucomicrobia* 主要定植于胃肠道外黏液层, 促进外黏蛋白层更新, 增强肠上皮细胞完整性和相关黏膜免疫反应^[44], 并且还可利用胃肠道黏蛋白发酵产生乙酸盐、丙酸盐和乙醇, 调节宿主免疫反应^[45]。 *Paraprevotella* 能促进蛋白质和非纤维素多糖物质在肠道内的消化和发酵, 而实际上 0.1% 复合菌制剂组的麻羽肉鸡表现出的生长和免疫性能更好, 表明高水平复合菌制剂对单个菌的影响作用并不一定能在表型上体现出来, 反而受到抑制, 具体机制有待于进一步研究。 *Faecalibacterium* 可产生组蛋白去乙酰化酶抑制丁酸盐生成, 丁酸盐作为能量来源, 不仅具有调节肠道菌群、维持体液和电解质平衡等多种生理功能, 还能抑制炎症因子的释放, 保护肠黏膜屏障^[46]。 本研究中, 复合菌制剂显著降低 *Faecalibacterium* 的相对丰度, 表明复合菌制剂能通过降低 *Faecalibacterium* 相对丰度来提高肠道丁酸盐含量, 这与复合菌制剂不同程度地为麻羽肉鸡带来的益处是一致的。

4 结论

在麻羽肉鸡饲料中添加不同水平复合菌制剂可不同程度地改善其血清代谢、生长、消化和免疫性能, 并对肠道菌群结构产生影响, 其中 0.1% 为适宜添加量。

参考文献:

- [1] BRANDT K K, AMÉZQUITA A, BACKHAUS T, et al. Ecotoxicological Assessment of Antibiotics: A Call for Improved Consideration of Microorganisms [J]. *Environment International*, 2015, 85: 189-205.
- [2] AMOAH K, HUANG Q C, TAN B P, et al. Dietary Supplementation of Probiotic *Bacillus coagulans* ATCC 7050, Improves the Growth Performance, Intestinal Morphology, Microflora, Immune Response, and Disease Confrontation of Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 87: 796-808.
- [3] LAMBO M T, CHANG X F, LIU D S. The Recent Trend in the Use of Multistrain Probiotics in Livestock Production: an Overview [J]. *Animals*, 2021, 11(10): 2805.
- [4] BERMUDEZ-BRITO M, PLAZA-DÍAZ J, MUÑOZ-QUEZADA S, et al. Probiotic Mechanisms of Action [J]. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 2012, 61(2): 160-174.
- [5] ALEXOPOULOS C, GEORGOULAKIS I E, TZIVARA A, et al. Field Evaluation of the Efficacy of a Probiotic Containing *Bacillus licheniformis* and *Bacillus subtilis* Spores, on the Health Status and Performance of Sows and Their Litters [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2004, 88(11-12): 381-392.
- [6] CAO G T, ZENG X F, CHEN A G, et al. Effects of a Probiotic, *Enterococcus faecium*, on Growth Performance, Intestinal Morphology, Immune Response, and Cecal Microflora in Broiler Chickens Challenged with *Escherichia Coli* K88 [J]. *Poultry Science*, 2013, 92(11): 2949-2955.
- [7] CASTAÑEDA C D, DITTOE D K, WAMSLEY K G S, et al. In Ovo Inoculation of an *Enterococcus faecium*-based Product to Enhance Broiler Hatchability, Live Performance, and Intestinal Morphology [J]. *Poultry Science*, 2020, 99(11): 6163-6172.
- [8] SHIN D, CHANG S Y, BOGERE P, et al. Beneficial Roles of Probiotics on the Modulation of Gut Microbiota and Immune Response in Pigs [J]. *PLoS One*, 2019, 14(8): e0220843.
- [9] KOIKE S, UENO M, ASHIDA N, et al. Effect of *Bacillus subtilis* C-3102 Supplementation in Milk Replacer on Growth and Rumen Microbiota in Preweaned Calves [J]. *Animal Science Journal*, 2021, 92(1): e13580.
- [10] DENG B, WU J, LI X H, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on Growth Performance, Serum Parameters, Digestive Enzyme, Intestinal Morphology, and Colonic Microbiota in Piglets [J]. *AMB Express*, 2020, 10(1): 1-10.
- [11] ABDEL-MONEIM A M E, ELBAZ A M, KHIDR R E S, et al. Effect of in Ovo Inoculation of *Bifidobacterium* Spp. on Growth Performance, Thyroid Activity, Ileum Histomorphometry, and Microbial Enumeration of Broilers [J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2020, 12(3): 873-882.

- [12] 张安荣,刘娇,陈志敏,等. 丁酸梭菌对肉鸡钙磷代谢和胫骨指标的影响 [J]. 中国畜牧兽医, 2020, 47(9): 2849-2856.
- [13] WANG W W, CAI H Y, ZHANG A R, et al. *Enterococcus faecium* Modulates the Gut Microbiota of Broilers and Enhances Phosphorus Absorption and Utilization [J]. Animals, 2020, 10(7): 1232.
- [14] 张静, 庄建萍, 王晓峰, 等. 饮水添加嗜酸乳杆菌液对蛋鸡产蛋性能、蛋品质和血清生化指标的影响 [J]. 中国家禽, 2023, 45(3): 66-70.
- [15] COLLADO M C, GUEIMONDE M, HERNÁNDEZ M, et al. Adhesion of Selected Bifidobacterium Strains to Human Intestinal Mucus and the Role of Adhesion in Enteropathogen Exclusion [J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(12): 2672-2678.
- [16] TIMMERMAN H M, KONING C J M, MULDER L, et al. Monostrain, Multistain and Multispecies Probiotics-A Comparison of Functionality and Efficacy [J]. International Journal of Food Microbiology, 2004, 96(3): 219-233.
- [17] LIU C Q, ZHU Q, CHANG J A, et al. Effects of *Lactobacillus casei* and *Enterococcus faecalis* on Growth Performance, Immune Function and Gut Microbiota of Suckling Piglets [J]. Archives of Animal Nutrition, 2017, 71(2): 120-133.
- [18] YU J, DONG B, ZHAO M M, et al. Dietary *Clostridium butyricum* and *Bacillus subtilis* Promote Goose Growth by Improving Intestinal Structure and Function, Antioxidative Capacity and Microbial Composition [J]. Animals: an Open Access Journal from MDPI, 2021, 11(11): 3174.
- [19] LEMA M, WILLIAMS L, RAO D R. Reduction of Fecal Shedding of Enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157: H7 in Lambs by Feeding Microbial Feed Supplement [J]. Small Ruminant Research, 2001, 39(1): 31-39.
- [20] 中华人民共和国农业农村部. 家禽生产性能名词术语和度量计算方法: NY/T 823-2020 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [21] MARTIN-GALLAUSIAUX C, MARINELLI L, BLOTTIÈRE H M, et al. SCFA: Mechanisms and Functional Importance in the Gut [J]. The Proceedings of the Nutrition Society, 2021, 80(1): 37-49.
- [22] VANGAVETI V, SHASHIDHAR V, JARROD G, et al. Free Fatty Acid Receptors: Emerging Targets for Treatment of Diabetes and Its Complications [J]. Therapeutic Advances in Endocrinology and Metabolism, 2010, 1(4): 165-175.
- [23] 胥彩玉. 饲料中添加粪肠球菌对肉仔鸡生产性能、肉品质和血浆代谢组的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [24] ZHAO X, GUO Y M, GUO S S, et al. Effects of *Clostridium butyricum* and *Enterococcus faecium* on Growth Performance, Lipid Metabolism, and Cecal Microbiota of Broiler Chickens [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(14): 6477-6488.
- [25] CAPCAROVA M, WEISS J, HRNCAR C, et al. Effect of *Lactobacillus fermentum* and *Enterococcus faecium* Strains on Internal Milieu, Antioxidant Status and Body Weight of Broiler Chickens [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2010, 94(5): e215-e224.
- [26] CHEN C Y, CHEN S W, WANG H T. Effect of Supplementation of Yeast with Bacteriocin and *Lactobacillus* Culture on Growth Performance, Cecal Fermentation, Microbiota Composition, and Blood Characteristics in Broiler Chickens [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2017, 30(2): 211-220.
- [27] 何航, 陈脊宇, 唐弋钦, 等. 饲料粗纤维水平对四川白鹅生长性能、屠宰性能及血清生化指标的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(6): 44-51.
- [28] LIU Y H, LIU C, HUANG L Q, et al. A Discovery of Relevant Hepatoprotective Effects and Underlying Mechanisms of Dietary *Clostridium Butyricum* Against Corticosterone-Induced Liver Injury in Pekin Ducks [J]. Microorganisms, 2019, 7(9): 358.
- [29] XIA J F, LV L X, LIU B Q, et al. Akkermansia Muciniphila Ameliorates Acetaminophen-induced Liver Injury by Regulating Gut Microbial Composition and Metabolism [J]. Microbiology Spectrum, 2022, 10(1): e0159621.
- [30] FERNANDEZ N J, KIDNEY B A. Alkaline Phosphatase: Beyond the Liver [J]. Veterinary Clinical Pathology, 2007, 36(3): 223-233.
- [31] ERTEK S. High-density Lipoprotein (HDL) Dysfunction and the Future of HDL [J]. Current Vascular Pharmacology,

- 2018, 16(5): 490-498.
- [32] LAMOT D M, SAPKOTA D, WIJTEN P J A, et al. Diet Density during the First Week of Life: Effects on Growth Performance, Digestive Organ Weight, and Nutrient Digestion of Broiler Chickens [J]. Poultry Science, 2019, 98(2): 789-795.
- [33] SALIM H M, KANG H K, AKTER N, et al. Supplementation of Direct-fed Microbials as an Alternative to Antibiotic on Growth Performance, Immune Response, Cecal Microbial Population, and Ileal Morphology of Broiler Chickens [J]. Poultry Science, 2013, 92(8): 2084-2090.
- [34] KRISTIANSEN M, MERRIFIELD D L, VECINO J L G, et al. Evaluation of Prebiotic and Probiotic Effects on the Intestinal Gut Microbiota and Histology of Atlantic Salmon [J]. International Aqua Feed, 2013, 16(5): 42-48.
- [35] 宋波, 文国琴, 王茜. 胆汁酸代谢与肠道微生物 [J]. 微生物学杂志, 2021, 41(3): 107-112.
- [36] BISWAS A, DEV K, TYAGI P K, et al. The Effect of Multi-strain Probiotics as Feed Additives on Performance, Immunity, Expression of Nutrient Transporter Genes and Gut Morphometry in Broiler Chickens [J]. Animal Bioscience, 2022, 35(1): 64-74.
- [37] CHENG Y F, CHEN Y P, LI J, et al. Dietary B-sitosterol Regulates Serum Lipid Level and Improves Immune Function, Antioxidant Status, and Intestinal Morphology in Broilers [J]. Poultry Science, 2020, 99(3): 1400-1408.
- [38] PROFT T, BAKER E N. Pili in Gram-negative and Gram-positive Bacteria-Structure, Assembly and Their Role in Disease [J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2009, 66(4): 613-635.
- [39] FREI R, AKDIS M, O'MAHONY L. Prebiotics, Probiotics, Synbiotics, and the Immune System [J]. Current Opinion in Gastroenterology, 2015, 31(2): 153-158.
- [40] GOURBEYRE P, DENERY S, BODINIER M. Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics: Impact on the Gut Immune System and Allergic Reactions [J]. Journal of Leukocyte Biology, 2011, 89(5): 685-695.
- [41] CHICHLOWSKI M, CROOM J, MCBRIDE B W, et al. Direct-fed Microbial Primalac and Salinomycin Modulate Whole-body and Intestinal Oxygen Consumption and Intestinal Mucosal Cytokine Production in the Broiler Chick [J]. Poultry Science, 2007, 86(6): 1100-1106.
- [42] FARNELL M B, DONOGHUE A M, DE LOS SANTOS F S, et al. Upregulation of Oxidative Burst and Degranulation in Chicken Heterophils Stimulated with Probiotic Bacteria [J]. Poultry Science, 2006, 85(11): 1900-1906.
- [43] ZHANG Y W, MA W F, ZHANG Z D, et al. Effects of *Enterococcus faecalis* on Egg Production, Egg Quality and Caecal Microbiota of Hens during the Late Laying Period [J]. Archives of Animal Nutrition, 2019, 73(3): 208-221.
- [44] REUNANEN J, KAINULAINEN V, HUUSKONEN L, et al. Akkermansia Muciniphila Adheres to Enterocytes and Strengthens the Integrity of the Epithelial Cell Layer [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015, 81(11): 3655-3662.
- [45] MASLOWSKI K M, VIEIRA A T, NG A, et al. Regulation of Inflammatory Responses by Gut Microbiota and Chemottractant Receptor GPR43 [J]. Nature, 2009, 461(7268): 1282-1286.
- [46] HOFMANOVÁ J, STRAKOVÁ N, VACULOVÁ A H, et al. Interaction of Dietary Fatty Acids with Tumour Necrosis Factor Family Cytokines during Colon Inflammation and Cancer [J]. Mediators of Inflammation, 2014(3): 848632-848648.