

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.03.001

伏彭辉, 周尹航, 陈鱼, 等. 饲料添加益生菌和酶制剂对 0~8 周龄蛋鸡生长发育的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(3): 1-10.

饲料添加益生菌和酶制剂对 0~8 周龄蛋鸡生长发育的影响

伏彭辉¹, 周尹航¹, 陈鱼¹, 陈艳青², 刘安芳¹

1. 西南大学 动物科学技术学院, 重庆 402460; 2. 挑战集团天津博菲德科技有限公司, 天津 301906

摘要: 益生菌、酶制剂等无污染的饲料添加剂作为抗生素的替代品目前已普遍应用到畜禽生产中, 探究益生菌与酶制剂对 0~8 周龄蛋鸡生长发育、肠道发育和肠道微生物的影响, 选择 120 只体质量相近的 1 日龄海兰褐蛋鸡(雌性), 随机分为 4 个组: 对照组(Con 组)、粪肠球菌组(EF 组)、复合酶组(CE 组)、酶菌协同组(CE+EF 组), 每组 5 个重复、每个重复 6 只鸡, 试验期为 8 周。Con 组饲喂基础饲料, EF 组在基础饲料中添加粪肠球菌 100 mg/kg, CE 组在基础饲料中添加 100 mg/kg 酶制剂, CE+EF 组在基础饲料中添加酶制剂与粪肠球菌各 100 mg/kg。结果发现: CE+EF 组与 Con 组相比, 显著提高了体质量、龙骨长、胸宽以及生长激素(GH)、生长激素受体(GHR)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)的含量($p < 0.05$), 显著增加了十二指肠和回肠的绒毛高度($p < 0.05$)并显著提高了回肠的绒隐比($p < 0.05$)。CE+EF 组显著增加了粪杆菌属和拟杆菌属的相对丰度, 同时部分优势菌属相对丰度与雏鸡血清 GH、GHR 和 GPX 含量呈显著正相关。EF 组显著增加了疣微菌门、拟杆菌门、阿克曼氏菌属的相对丰度。综合表明: 添加粪肠球菌和复合酶制剂可以促进 0~8 周龄蛋鸡的生长发育, 改善肠道形态, 提高肠道有益菌的丰度, 促进肠道健康。粪肠球菌与酶制剂联合使用具有较好的协同作用, 可以作为蛋鸡生产中抗生素的有效替代品。

关键词: 0~8 周龄蛋鸡; 粪肠球菌; 复合酶制剂; 生长发育;

肠道微生物

中图分类号: S831.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2026)03-0001-10



Effects of Dietary Supplementation with Probiotics and Enzyme Preparations on the Growth and Development of Laying Hens Aged 0—8 Weeks

FU Penghui¹, ZHOU Yinhang¹, CHEN Yu¹,
CHEN Yanqing², LIU Anfang¹

收稿日期: 2025-07-17

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0220); 中央高校基本业务费专项(SWU224002)。

作者简介: 伏彭辉, 博士, 讲师, 主要从事动物遗传育种与繁殖研究。

通信作者: 刘安芳, 博士, 教授, 博士研究生导师。

1. College of Animal Science and Technology, Southwest University, Chongqing 402460, China;
2. Tianjin Biofeed Technology Co., Ltd., Challenge Group, Tianjin 301906, China

Abstract: Probiotics, enzyme preparations and other eco-friendly feed additives have been widely used as viable alternatives to antibiotics in livestock and poultry production. This study aimed to investigate the effects of probiotics and enzyme preparations on growth and development, intestinal development and gut microbiome in 0–8 week-old laying hens. A total of 120 one-day-old Hy-Line Brown hens (female) with similar body weights were randomly allocated into four groups: control group(Con), *Enterococcus faecalis* group (EF), compound enzyme group (CE), and enzyme-probiotic combination group (CE+EF). Each group comprised five replicates, with six hens per replicate. The experiment lasted for eight weeks. The Con group received a basal diet, while the EF, CE, and CE+EF groups were supplemented with 100 mg/kg *Enterococcus faecalis*, 100 mg/kg enzyme preparation, and both *Enterococcus faecalis* and enzyme preparation at 100 mg/kg each, respectively. Compared with the Con group, the CE+EF group significantly increased the body weight, keel length and chest width, as well as the serum concentrations of growth hormone (GH), growth hormone receptor (GHR), and glutathione peroxidase (GPX) ($p < 0.05$). Additionally, the CE+EF group exhibited a marked elevation in villus height in both the duodenum and ileum ($p < 0.05$), along with an improved villus-to-crypt ratio in the ileum ($p < 0.05$). Microbial analysis revealed that the CE+EF group demonstrated a notable increase in the relative abundance of the genera *Faecalibacterium* and *Bacteroides*. Meanwhile, the relative abundance of some dominant bacterial genera showed a significant positive correlation with the serum GH, GHR, and GPX levels of brooding hens. The EF group significantly enriched the relative abundance of the phylum *Verrucomicrobiota*, the phylum *Bacteroidota*, and the genus *Akkermansia*. In summary, the supplementation of *Enterococcus faecalis* and enzyme preparations promoted growth, improved intestinal morphology and enhanced the abundance of beneficial microbiota, thereby promoting intestinal health in 0–8 week-old laying hens. The combination of *Enterococcus faecalis* and enzyme preparations has a good synergistic effect and can be used as an effective alternative to antibiotics in egg chicken production.

Key words: 0–8 week-old laying hens; *Enterococcus faecalis*; compound enzyme preparation; growth and development; gut microbiome

畜牧业中抗生素的长期使用会导致动物耐药性的增加以及药物残留等问题, 对环境和人类健康造成巨大的潜在威胁^[1]。以促进动物机体肠道健康发育和提高免疫力为主要功能的益生菌和酶制剂, 作为抗生素的替代品为无抗饲料的生产提供了可行方案。益生菌可以有效抑制宿主体内的病原菌, 提高宿主的免疫力、增加体质量、提高生产性能、平衡肠道的微生物群^[2]。酶制剂是饲料中最重要和最常见的添加剂, 可以作为动物内源性酶的有益补充, 辅助其降解饲料, 促进营养成分的吸收。

益生菌在动物机体内可以分泌产生细菌素、溶菌酶、过氧化氢、蛋白酶等有杀菌或抑菌作用的物质, 直接对病原体产生拮抗作用。益生菌产生的有机酸和挥发性脂肪酸(如乳酸、乙酸、丁酸和丙酸)能改变肠道 pH 值, 通过降低肠道 pH 值抑制病原体在消化道中的定植, 从而竞争性地抑制病原体^[3]; 同时益生菌可通过竞争附着位点来阻止病原体在肠道表面的生长, 阻碍病原微生物的竞争和结合^[4]; 益生菌还可以平衡肠道微生物, 改善肠道完整性, 调节免疫功能^[5]。粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*)作为常用益生菌常常被添加在鸡的饲料中。Shehata 等^[6]研究发现肉鸡口服粪肠球菌 1×10^8 CFU/d, 可显著提

高肉鸡的饲料转化率。

动物饲料含有大量非淀粉多糖(NSP),会导致消化物黏度增加,从而抑制动物的生长性能,而酶制剂能降低食糜的黏度。碳水化合物酶能够将NSP水解成更小的低聚糖,使消化液黏度降低并释放营养物质^[7]。NSP的水解产物通过益生菌的发酵,可以产生短链脂肪酸(SCFA),而SCFA的浓度增加通常与有益菌数量的增加和病原菌数量的减少相关^[8]。纤维素酶是由内切葡聚糖酶、纤维二糖水解酶和 β -葡萄糖苷酶组成的一组水解酶^[9]。对于非草食动物而言,无法分解细胞壁中的纤维素和果胶等物质,因此在饲料中添加纤维素酶、果胶酶等酶制剂可以帮助鸡分解植物细胞壁,提高饲料中营养成分的利用率^[10]。

目前,关于益生菌或酶制剂的研究和应用在肉鸡和产蛋期的蛋鸡较多,对于酶菌协同添加以及有关0~8周龄蛋鸡的研究相对较少。0~8周龄蛋鸡的免疫和消化器官尚未发育完全,免疫能力较低,且无法分泌足够的内源酶来供机体消化和吸收饲料中的营养成分^[11],因此,本研究以0~8周龄蛋鸡为试验对象,探究饲料中粪肠球菌和酶制剂协同添加对其体重、体尺、生长激素、抗氧化能力和肠道发育等的影响,为蛋鸡的无抗饲料研究与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

粪肠球菌与复合酶制剂来自挑战集团天津博菲德科技有限公司。粪肠球菌(优C-100):活菌数 $\geq 1 \times 10^{10}$ CFU/g;复合酶制剂(8308)主要成分:蛋白酶 $\geq 12\,000$ U/g、淀粉酶 $\geq 5\,000$ U/g、 β -葡聚糖酶 $\geq 2\,500$ U/g、木聚糖酶 $\geq 30\,000$ U/g、纤维素酶 ≥ 500 U/g。蛋鸡基础饲料为正大521蛋小鸡配合饲料,主要营养成分(%):粗蛋白 ≥ 20.0 ,水分 ≤ 14.0 ,钙 $0.6 \sim 1.2$,总磷 0.5 ,氯化钠 $0.2 \sim 0.8$,粗纤维 ≤ 6.0 ,粗灰分 ≤ 8.0 ,蛋氨酸+胱氨酸 ≥ 0.74 。

1.2 试验动物与设计

采用单因素随机试验设计,试验动物选择体质量相近的120只1日龄海兰褐蛋鸡(雌性),随机分为4个组,每组5个重复,每个重复6只鸡。对照组(Con组)饲喂基础饲料,复合酶组(CE组)在基础饲料中添加酶制剂100 mg/kg,粪肠球菌组(EF组)在基础饲料中添加粪肠球菌100 mg/kg,酶菌协同组(CE+EF组)在基础饲料中添加酶制剂与粪肠球菌各100 mg/kg,试验期为8周。试验鸡群采用自由采食、自由饮水的方式进行饲养,并按照育雏期免疫程序对鸡群进行免疫处理。

1.3 测定试剂盒

测定血液抗氧化指标及生长激素指标试剂盒:超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)、总抗氧化能力(T-AOC)、生长激素(GH)、生长激素受体(GHR)均来自上海酶联生物。

1.4 样品采集

试验第8周结束后,海兰褐蛋鸡翅下静脉采血10 mL并分装到不含抗凝剂的采血管中,静置15 min后,以3 500 r/min离心15 min取上层血清分装到冻存管中置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱和液氮速冻后置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中备用。对鸡进行动脉放血处死后,解剖分离十二指肠、空肠、回肠,将各肠段剖开清理内容物,取十二指肠、空肠、回肠中段各1 cm,置于4%的多聚甲醛中固定保存,同时取盲肠内容物分装于冻存管中,液氮速冻后置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中备用(西南大学实验动物伦理审查委员会批准,伦理审查号:LAC2025-2-0127)。

1.5 试验方法

体尺指标按照《家禽生产性能名词术语与度量计算方法》(NY/T 823—2020)测定。用微量法测定抗氧化指标SOD、T-AOC、GPX,使用酶联免疫分析法(ELISA)测定GH、GHR的含量,具体检测方法按试剂

盒说明书进行。十二指肠、空肠、回肠组织切片制作完成后,通过显微成像系统进行拍照,随机挑选 10 个完整的肠绒毛以及隐窝利用 Image 软件进行测量,并计算绒隐比(绒毛高度/隐窝深度)。

1.6 数据分析

数据使用 SPSS 2022 进行 ANOVA 单因素方差分析,并用 Duncan 法进行多重比较,LEfse 差异分析阈值, $p < 0.05$ 为差异有统计学意义。盲肠 16 S rDNA 测序由杭州联川生物技术股份有限公司完成;以 $p < 0.05$, $LDA > 4$ 来筛选不同组间的差异微生物;使用 R 包进行相关性分析,选择盲肠菌群属水平中相对丰度前 20 的菌群与表型数据进行 Spearman 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同饲料组对 0~8 周龄蛋鸡生长发育的影响

2.1.1 对蛋鸡体质量和体尺指标的影响

由表 1 可知,在饲料中添加粪肠球菌(EF)和复合酶制剂(CE)对 0~8 周龄蛋鸡的体斜长、胸深、胫围、胫长均无明显影响($p > 0.05$),但 CE+EF 组相比于 Con 组有提高体斜长、胸深、胫围和胫长的趋势。CE+EF 组、CE 组显著提高了 0~8 周龄蛋鸡的龙骨长($p < 0.05$);另外,体质量指标 CE+EF 组显著高于 Con 组($p < 0.05$);胸宽指标 CE+EF 组显著高于 CE 组和 Con 组($p < 0.05$)。

表 1 不同饲料组对 0~8 周龄蛋鸡体质量和体尺指标的影响

| 组别 | 体质量/ g | 体斜长/ cm | 龙骨长/ cm | 胸深/ cm | 胸宽/ cm | 胫围/ cm | 胫长/ cm |
|-------|----------------|------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| CE+EF | 673.27±28.33a | 13.48±0.50 | 7.61±0.31a | 7.14±0.30 | 4.55±0.09a | 3.22±0.14 | 6.08±0.13 |
| EF | 639.83±35.38ab | 12.88±0.20 | 6.97±0.19ab | 6.72±0.21 | 4.23±0.08ab | 3.08±0.09 | 5.97±0.26 |
| CE | 638.48±53.98ab | 13.30±0.30 | 7.48±0.14a | 7.08±0.28 | 4.18±0.14b | 3.12±0.04 | 5.98±0.20 |
| Con | 610.20±40.08b | 12.67±0.31 | 6.79±0.23b | 6.41±0.29 | 4.07±0.14b | 3.15±0.12 | 5.68±0.20 |

注:同列数据小写字母不同表示 $p < 0.05$,差异有统计学意义,下同。

2.1.2 对蛋鸡血液指标的影响

由图 1 可知,对于血清中 GH 和 GHR 含量,CE+EF 组显著高于 EF 组、CE 组和 Con 组($p < 0.05$),EF 组、CE 组、Con 组间差异无统计学意义($p > 0.05$)。对于抗氧化指标方面,无论是单独添加复合酶制剂(CE)、粪肠球菌(EF),还是作为酶菌协同添加(CE+EF 组)对 0~8 周龄蛋鸡的总抗氧化能力(T-AOC)、超氧化物歧化酶(SOD)活性都无显著影响($p > 0.05$);对于谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性,CE+EF 组显著高于 Con 组($p < 0.05$);EF 组、CE 组与 Con 组间差异无统计学意义($p > 0.05$),但 EF 组和 CE 组相比于 Con 组有提升的趋势。

2.2 对蛋鸡肠道形态的影响

由表 2 可知,在十二指肠中,CE+EF 组的绒毛高度显著高于 EF 组、CE 组和 Con 组($p < 0.05$),EF 组绒毛高度显著低于 Con 组($p < 0.05$);EF 组和 CE 组的隐窝深度均显著低于 CE+EF 组和 Con 组($p < 0.05$);绒隐比差异无统计学意义($p > 0.05$)。对于空肠,在绒毛高度方面,EF 组显著高于 CE 组($p < 0.05$);隐窝深度方面,CE 组会增加隐窝深度,与 CE+EF 组、EF 组、Con 组间差异有统计学意义($p < 0.05$);绒隐比方面,EF 组最大,显著高于 CE+EF 组、CE 组、Con 组($p < 0.05$),CE 组绒隐比最小,显著低于其他 3 组($p < 0.05$),CE+EF 组与 Con 组间差异无统计学意义($p > 0.05$)。对于回肠,Con 组的绒毛高度显著低于 CE+EF 组、EF 组和 CE 组($p < 0.05$);隐窝深度各组间差异无统计学意义($p > 0.05$);绒隐比方面,Con 组最小,显著低于 CE+EF 组、EF 组($p < 0.05$)。

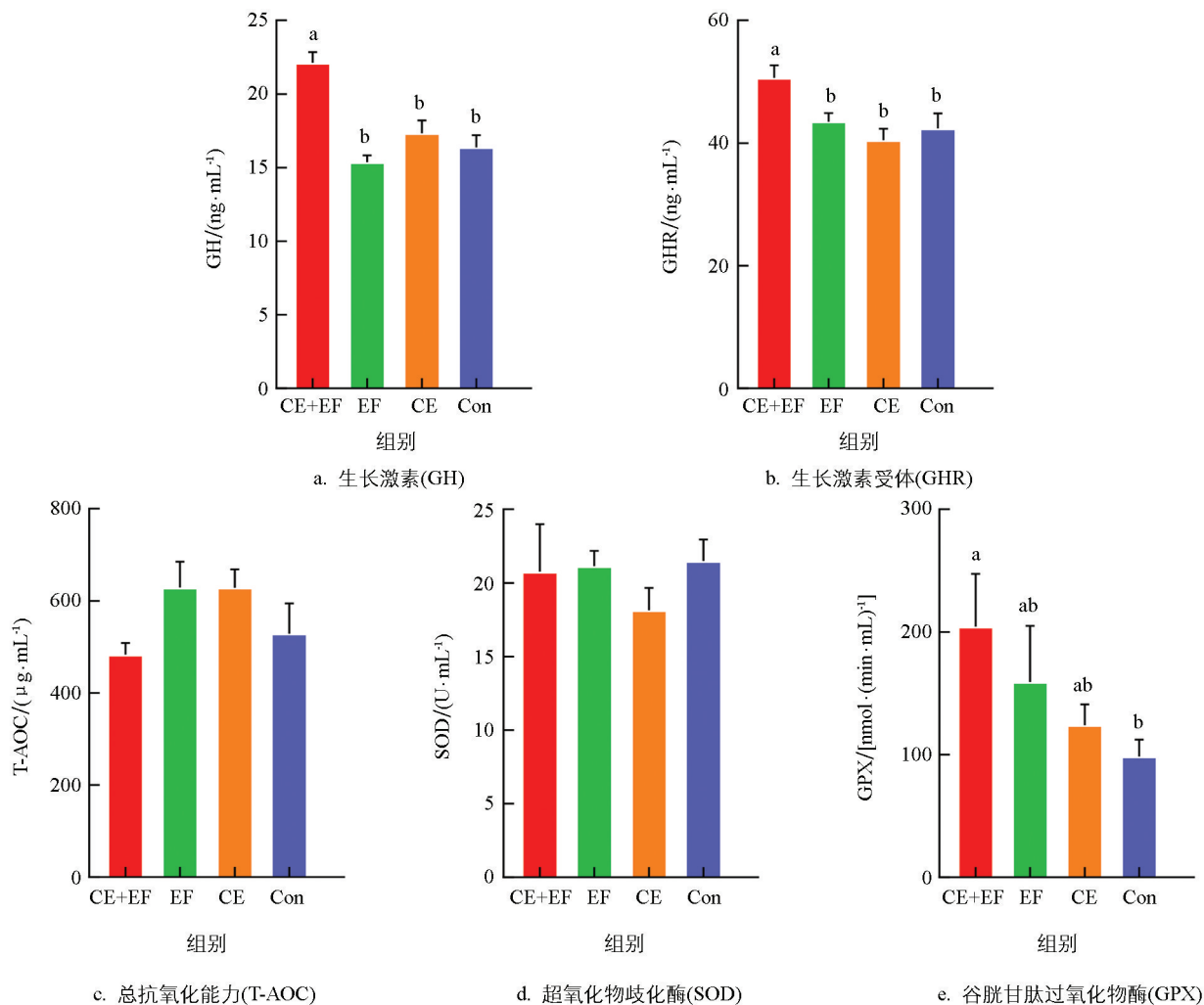


图 1 不同饲料组对 0~8 周龄蛋鸡血液指标的影响

表 2 不同饲料组对 0~8 周龄蛋鸡肠道形态的影响

| 肠段 | 组别 | 绒毛高度/μm | 隐窝深度/μm | 绒隐比 |
|------|-------|------------------|--------------|-------------|
| 十二指肠 | CE+EF | 1 295.11±10.54a | 190.26±7.70a | 6.93±0.28 |
| | EF | 1 062.30±13.44c | 150.87±5.07b | 7.15±0.30 |
| | CE | 1 074.37±21.72bc | 153.54±7.25b | 7.18±0.38 |
| | Con | 1 146.87±47.58b | 173.95±6.37a | 6.70±0.39 |
| 空肠 | CE+EF | 742.09±9.42ab | 113.29±2.24b | 6.57±0.17b |
| | EF | 777.53±12.77a | 104.67±4.93b | 7.54±0.27a |
| | CE | 680.00±30.59b | 147.29±5.70a | 4.66±0.23c |
| | Con | 754.45±33.87ab | 120.36±6.88b | 6.33±0.18b |
| 回肠 | CE+EF | 610.21±9.14a | 102.79±2.72 | 5.97±0.16a |
| | EF | 573.44±7.07a | 101.31±1.89 | 5.68±0.12a |
| | CE | 608.16±17.35a | 108.99±3.09 | 5.61±0.20ab |
| | Con | 518.60±14.20b | 103.73±4.27 | 5.15±0.17b |

2.3 不同饲料组对 0~8 周龄蛋鸡盲肠微生物的影响

2.3.1 盲肠微生物 Alpha 多样性分析

由表 3 可知,与 Con 组相比,EF 组 Shannon 指数、Simpson 指数显著降低($p < 0.05$),其余组间差异无统计学意义($p > 0.05$)。对于 Chao1 指数、ACE 指数,4 组间差异均无统计学意义($p > 0.05$)。

表 3 不同饲料组盲肠微生物 Alpha 多样性分析

| 组别 | Shannon 指数 | Simpson 指数 | Chao1 指数 | ACE 指数 |
|-------|-------------|--------------|-----------------|-----------------|
| CE+EF | 7.44±0.28ab | 0.97±0.01ab | 1 091.72±90.64 | 1 102.60±93.00 |
| EF | 6.76±0.36b | 0.95±0.01b | 1 005.06±102.68 | 1 020.08±105.71 |
| CE | 7.52±0.14ab | 0.98±0.003ab | 1 012.84±115.77 | 1 019.63±117.56 |
| Con | 7.88±0.07a | 0.99±0.001a | 1 252.99±79.93 | 1 271.58±82.07 |

2.3.2 盲肠微生物 Beta 多样性分析

基于 Bray-Curtis 距离的主坐标分析对不同饲料组盲肠微生物进行 Beta 多样性的降维分析。PCoA 分析显示,CE+EF 组、EF 组、CE 组和 Con 组内存在较好的聚类,组间分开趋势明显,说明各组之间的盲肠微生物组成存在显著差异(图 2a)。NMDS 分析显示,各组的微生物组成也存在显著差异,同时 Stress 为 $0.1366 < 0.2$,证明数据可用(图 2b)。Anosim 分析检验后, $p=0.001$,证明组间差异大于组内差异,试验分组有意义(图 2c)。

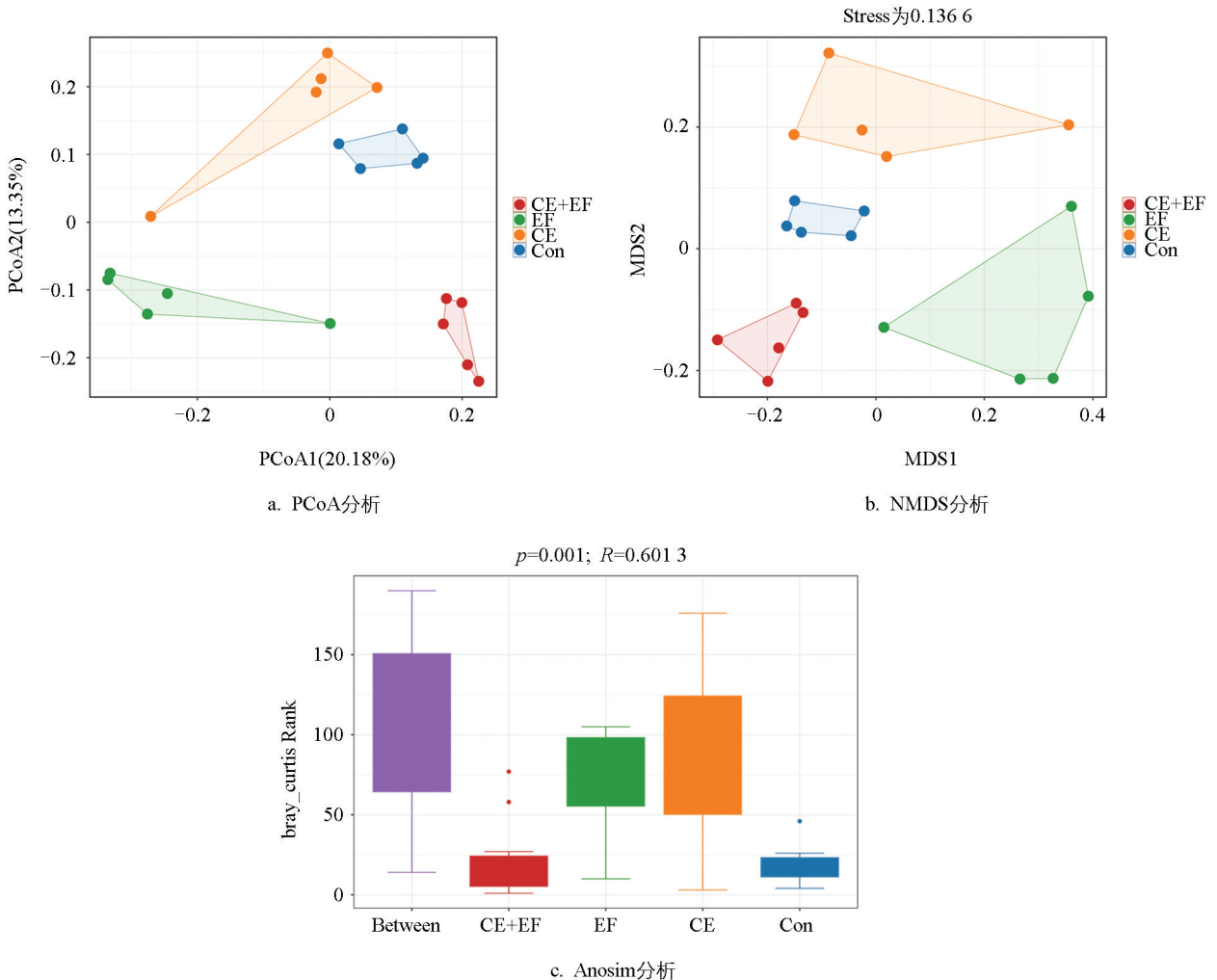


图 2 不同饲料组盲肠微生物 Beta 多样性分析

2.3.3 物种组成分析

进一步分析不同饲料组盲肠微生物在门、属水平上的相对丰度, 发现门水平上, 各试验组主要由厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidota)、脱硫杆菌门(Desulfobacterota)、变形菌门(Proteobacteria)、疣微菌门(Verrucomicrobiota)构成(图 3a)。属水平上, CE+EF 组的优势菌群主要为粪杆菌属(*Faecalibacterium*)、拟杆菌属(*Bacteroides*)、瘤胃球菌科属(*Ruminococcaceae_unclassified*)、*Clostridia_UCG-014_unclassified*、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*); EF 组的优势菌群为阿克曼氏菌属(*Akkermansia*)、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、巴恩斯氏菌属(*Barnesiella*)、拟杆菌属(*Bacteroides*)、*Clostridia_UCG_014_unclassified*; CE 组的优势菌群为脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、*Clostridia_UCG-014_unclassified*、拟杆菌属(*Bacteroides*)、瘤胃球菌科属(*Ruminococcaceae_unclassified*)、克里斯滕森菌属(*Christensenellaceae_R-7_group*)、*Negativibacillus*; Con 组的优势菌群为脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、*Clostridia_UCG-014_unclassified*、拟杆菌属(*Bacteroides*)、瘤胃球菌科属(*Ruminococcaceae_unclassified*)(图 3b)。CE+EF 组相比于 CE 组、EF 组、Con 组粪杆菌属的相对丰度增加明显, 同时还增加拟杆菌属的相对丰度。

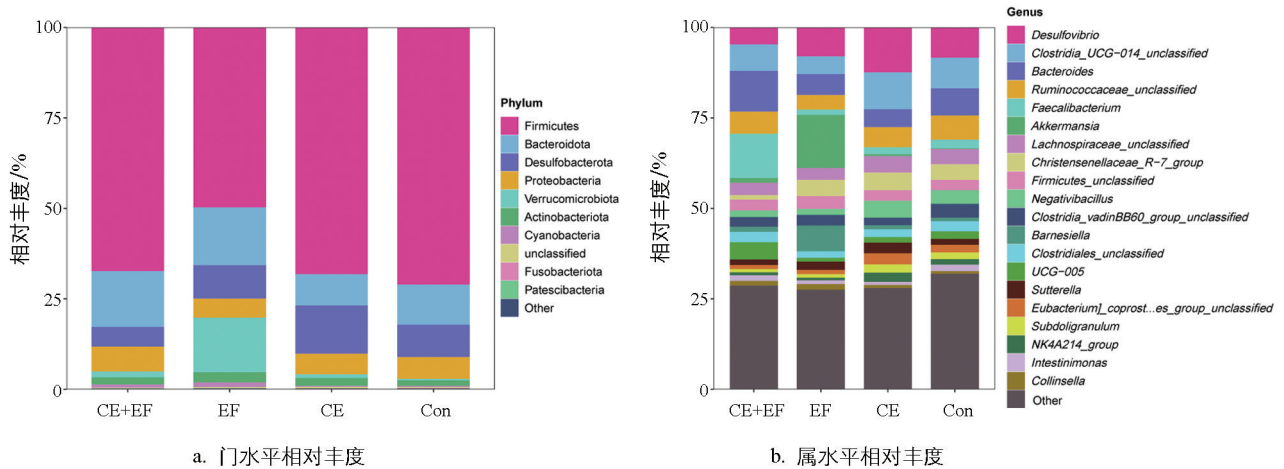


图 3 不同饲料组盲肠微生物组成

2.3.4 肠道微生物差异分析及菌群与表型相关性分析

为了寻找各组间的差异微生物, 以 $p < 0.05$, $LDA > 4$ 为阈值进行 LEfse(LDA Effect Size) 差异分析。由图 4a 可知, CE+EF 组显著富集了粪杆菌属(*Faecalibacterium*)、拟杆菌科(Bacteroidaceae)、拟杆菌属(*Bacteroides*)、颤螺菌科(Oscillospiraceae); EF 组显著富集了疣微菌门(Verrucomicrobiota)、拟杆菌门(Bacteroidota)、Akkermansiaceae、阿克曼氏菌属(*Akkermansia*); CE 组显著富集了脱硫杆菌门(Desulfobacterota)、脱硫弧菌科(Desulfovibrionaceae)、瘤胃球菌科(Ruminococcaceae)、克里斯滕森科(Christensenellaceae)、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、克里斯滕森菌属(*Christensenellaceae_R-7_group*)、*Negativibacillus*; Con 组显著富集了厚壁菌门(Firmicutes)和 *Ruminococcaceae_unclassified*。

为了进一步分析肠道菌群与表型之间的关系, 选择属水平相对丰度前 20 的菌群与 GH、GHR 以及抗氧化指标进行 Spearman 相关性分析。由图 4b 可知, GH 含量与粪杆菌属(*Faecalibacterium*)和拟杆菌属(*Bacteroides*)相对丰度呈显著正相关($p < 0.05$), *Christensenellaceae_R-7_group* 的相对丰度与 GH、GHR 含量呈显著负相关($p < 0.05$); 而 GHR 含量与拟杆菌属(*Bacteroides*)、科林斯菌属(*Collinsella*)、*Intestinimonas* 的相对丰度显著正相关($p < 0.05$); GPX 含量与 *Firmicutes_unclassified* 相对丰度呈显著正相关($p < 0.05$)。

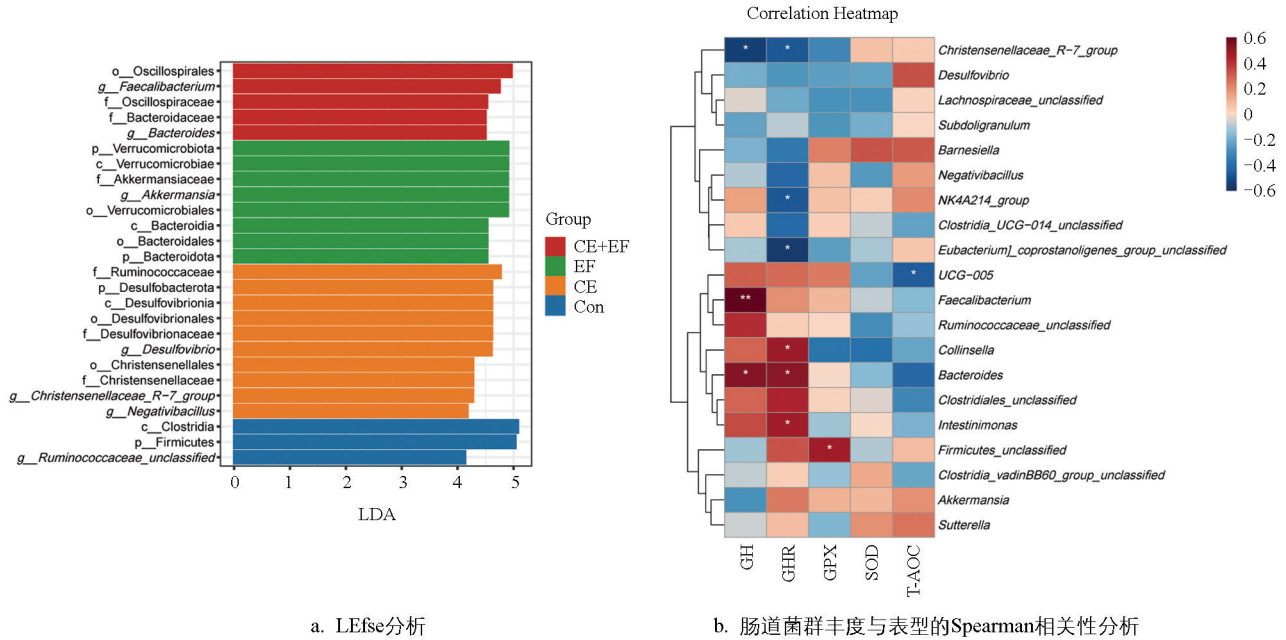


图 4 不同饲料组间 LefSe 分析和肠道菌群丰度与表型的相关性分析

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 饲料中酶和菌不同添加量对 0~8 周龄蛋鸡生长发育的影响

粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*)是兼性厌氧性革兰氏阳性菌,具有强大的环境适应能力,且对多种抗生素具有强耐受性,能够在动物肠道黏膜表层粘附,增强其肠道屏障功能,从而阻隔病原菌接触,并降低侵染机体的概率,是常见且理想的抗生素替代品^[12]。另外,粪肠球菌与酶制剂均可以提升、补充动物机体消化酶的活性,促进营养成分(蛋白质、糖类、纤维素等)的分解,促进动物的生长。武震宇等^[13]研究发现粪肠球菌能提升育成期鹅血清总蛋白和白蛋白的含量,王禹盟^[14]对海兰褐雏鸡采用粪肠球菌与粪菌移植处理后,发现添加粪肠球菌可以提高雏鸡的体质量和胫骨长。本研究结果表明粪肠球菌与复合酶制剂协同添加能够显著提高 0~8 周龄蛋鸡体质量、龙骨长和胸宽;同时,还检测到酶菌协同组(CE+EF 组)蛋鸡的 GH、GHR 和 GPX 含量显著高于其他组。在家禽中, GH 可以调节类固醇生成、细胞增殖和细胞凋亡,还可以调节促黄体素(LH)和胰岛素样生长因子(IGF)的合成^[15]。GPX 可以通过将还原型谷胱甘肽(GSH)氧化成谷胱甘肽二硫化物(GSSG),从而催化脂质过氧化物和过氧化氢转化为水和相应的脂质醇^[16],因此推测对 0~8 周龄蛋鸡添加粪肠球菌和复合酶制剂可以提高雏鸡血清 GPX 水平,增强机体的抗氧化能力和降低氧化应激,同时促进其体内 GH 和 GHR 的分泌,促进其生长发育。

3.1.2 饲料中酶和菌不同添加量对 0~8 周龄蛋鸡肠道形态的影响

小肠是鸡消化吸收的主要器官,绒毛高度、隐窝深度以及绒隐比反映了肠道消化吸收的能力,当绒毛高度、绒隐比增加,隐窝深度降低时,肠道的营养吸收能力提高。补充益生菌后可以增强蛋鸡的空肠形态,其绒毛表面积(VSA)增加,绒毛高度与隐窝深度、绒毛宽度和绒毛高度比以及隐窝深度显著降低^[17]。Mirsalami 等^[18]发现益生菌处理后增加了肉鸡十二指肠和空肠的绒毛高度,但在回肠中无明显变化。Wang 等^[19]发现添加复合益生菌,可以显著降低蛋鸡空肠的隐窝深度。本研究中添加粪肠球菌能增加 0~8 周龄蛋鸡空肠、回肠的绒毛高度和绒隐比,同时降低十二指肠和空肠的隐窝深度,这与前人研究一致。同时,酶菌协同添加会显著增加十二指肠的绒毛高度、回肠的绒毛高度和绒隐比,证明粪肠球菌或者酶菌协同可以增强 0~8 周龄蛋鸡的肠道形态、维护肠道健康。值得注意的是,与对照组相比,单独添加复合酶制剂能增加回肠的绒毛高度,降低十二指肠的隐窝深度,但会增加空肠的隐窝深度,降低空肠的绒毛高度和绒隐比,出现这种差异的原因还需要进一步探索。

3.1.3 饲料中酶和菌不同添加量对 0~8 周龄蛋鸡肠道微生物的影响

肠道菌群与宿主之间的联系非常紧密,肠道菌群可以通过各种途径来影响家禽的生长发育和新陈代谢。Zhang 等^[20]采用粪便微生物群移植法,用成年鸡(高体质量)肠道内的优势菌群(微杆菌属和鞘氨单胞菌属)重塑 1 日龄雏鸡的肠道微生物群,从而提高其生长性能,而脂肪代谢与优势菌群的相对丰度呈正相关,说明肠道微生物可以通过调节脂肪代谢提高鸡的生长性能。

在饲料中添加益生菌会影响鸡的肠道菌群,从而改善鸡的肠道健康等。付文娟等^[21]通过饲喂间型脉孢菌培养物,发现该益生菌有助于优化鸡的盲肠菌群结构,并且改善生产性能与健康程度。在本研究中,添加粪肠球菌后增加了拟杆菌门的相对丰度。拟杆菌门的微生物可以产生乙酸、丙酸、甲酸和丁酸等短链脂肪酸,有助于肠道营养物质的吸收并维持肠道健康^[22]。同时,添加菌或酶的试验组的疣微菌门均高于对照组,有研究发现疣微菌门的微生物,特别是 AKK 菌,具有抗炎和肠道屏障功能,高丰度的疣微菌门与宿主的健康密切相关^[23]。因此,添加粪肠球菌和复合酶制剂后,有利于增加 0~8 周龄蛋鸡盲肠有益菌的丰度,促进其肠道健康。

拟杆菌属和粪杆菌属都是肠道内常见益生菌,粪杆菌属可以促进短链脂肪酸(如丁酸)的产生,对于维持肠上皮细胞的健康和加强紧密连接增强肠道屏障功能至关重要^[24]。另外,研究表明鸡盲肠中粪杆菌属的丰度与丙酸盐、丁酸盐和戊酸盐浓度相关^[25-26]。本研究中,粪肠球菌和复合酶制剂协同添加后,拟杆菌属和粪杆菌属相对丰度显著高于其他组,添加粪肠球菌后阿克曼氏菌属(*Akkermansia*)的相对丰度也显著提高。阿克曼氏菌属下的嗜黏蛋白阿克曼氏菌(*Akkermansia muciniphila*)在代谢调节、免疫调节和肠道健康保护方面发挥着重要作用,被称为下一代益生菌^[27]。另外,本研究中 CE+EF 组的标志微生物为粪杆菌属和拟杆菌属,EF 组的标志微生物为阿克曼氏菌属,CE 组为克里斯滕森菌属,说明饲料中添加粪肠球菌和酶制剂可以增加 0~8 周龄蛋鸡肠道内有益菌的含量。

本研究中肠道菌群与表型相关性分析结果显示,蛋鸡血清 GH 含量与肠道内拟杆菌属和粪杆菌属相对丰度呈显著正相关,GHR 含量与拟杆菌属、科林斯菌属、*Intestinimonas* 的相对丰度呈显著正相关,GPX 的含量与 *Firmicutes unclassified* 的相对丰度呈显著正相关。推测饲料添加粪肠球菌和复合酶制剂能够通过增加 0~8 周龄蛋鸡肠道内有益菌的含量,改善微生物菌落结构,提高营养物质的利用率,同时影响机体内 GH、GHR 和 GPX 的分泌水平,从而促进其生长发育和肠道健康。

3.2 结论

饲料中添加粪肠球菌和复合酶制剂可以提高 0~8 周龄蛋鸡 GH、GHR 和 GPX 的含量,促进其生长发育和抗氧化能力,还可以改善其肠道形态发育,且酶菌协同使用效果更好,同时还能增加盲肠中有益菌如粪杆菌属、拟杆菌属、阿克曼氏菌属以及克里斯滕森菌属等的丰度,促进蛋鸡的肠道健康。

参考文献:

- [1] ABOUELHASSAN Y, GARRISON A T, YANG H F, et al. Recent Progress in Natural-Product-Inspired Programs Aimed to Address Antibiotic Resistance and Tolerance [J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2019, 62(17): 7618-7642.
- [2] NAEEM M, BOURASSA D. Probiotics in Poultry: Unlocking Productivity through Microbiome Modulation and Gut Health [J]. *Microorganisms*, 2025, 13(2): 257.
- [3] ABD EL-HACK M E, EL-SAADONY M T, SALEM H M, et al. Alternatives to Antibiotics for Organic Poultry Production: Types, Modes of Action and Impacts on Bird's Health and Production [J]. *Poultry Science*, 2022, 101(4): 101696.
- [4] MEHDI Y, LÉTOURNEAU-MONTMINY M P, GAUCHER M L, et al. Use of Antibiotics in Broiler Production: Global Impacts and Alternatives [J]. *Animal Nutrition*, 2018, 4(2): 170-178.
- [5] ABD EL-HACK M E, ALAIDAROOS B A, FARSI R M, et al. Impacts of Supplementing Broiler Diets with Biological Curcumin, Zinc Nanoparticles and *Bacillus Licheniformis* on Growth, Carcass Traits, Blood Indices, Meat Quality and Cecal Microbial Load [J]. *Animals*, 2021, 11(7): 1878.
- [6] SHEHATA A A, TARABEES R, BASIOUNI S, et al. Effect of a Potential Probiotic Candidate *Enterococcus faecalis-1* on Growth Performance, Intestinal Microbiota, and Immune Response of Commercial Broiler Chickens [J]. *Probiotics and*

- Antimicrobial Proteins, 2020, 12(2): 451-460.
- [7] KNUDSEN K E B. Fiber and Nonstarch Polysaccharide Content and Variation in Common Crops Used in Broiler Diets 1 [J]. Poultry Science, 2014, 93(9): 2380-2393.
- [8] HAN X B, MA Y, DING S J, et al. Regulation of Dietary Fiber on Intestinal Microorganisms and Its Effects on Animal Health [J]. Animal Nutrition, 2023, 14: 356-369.
- [9] 李春英, 崔明娟, 董士嘉, 等. 转录因子 TeACE1 在 *Talaromyces* sp. 纤维素酶合成中的功能 [J]. 东北农业大学学报, 2025, 56(4): 36-46.
- [10] KOUZOUNIS D, VAN ERVEN G, SOARES N, et al. The Fate of Insoluble Arabinoxylan and Lignin in Broilers: Influence of Cereal Type and Dietary Enzymes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 225: 1096-1106.
- [11] WU S R, LI T H, NIU H F, et al. Effects of Glucose Oxidase on Growth Performance, Gut Function, and Cecal Microbiota of Broiler Chickens [J]. Poultry Science, 2019, 98(2): 828-841.
- [12] LIN D J, GAO Y, ZHAO L D, et al. *Enterococcus faecalis* Lipoteichoic Acid Regulates Macrophages Autophagy via PI3K/Akt/mTOR Pathway [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 498(4): 1028-1036.
- [13] 武震宇, 王秋菊, 孙晓燕, 等. 粪肠球菌对育成期籽鹅生长性能、肉品质、腿肌中与蛋白质代谢相关基因表达及肠道菌群的影响 [J]. 动物营养学报, 2025, 37(6): 3840-3851.
- [14] 王禹盟. 粪菌移植联合粪肠球菌对雏鸡早期生长、免疫及肠道菌群的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2024.
- [15] HRABIA A. Growth Hormone Production and Role in the Reproductive System of Female Chicken [J]. General and Comparative Endocrinology, 2015, 220: 112-118.
- [16] ARTHUR J R. The Glutathione Peroxidases [J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2000, 57(13-14): 1825-1835.
- [17] OBIANWUNA U E, QIU K, CHANG X Y, et al. Enhancing Egg Production and Quality by the Supplementation of Probiotic Strains (*Clostridium* and *Brevibacillus*) via Improved Amino Acid Digestibility, Intestinal Health, Immune Response, and Antioxidant Activity [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 987241.
- [18] MIRSALAMI S M, MIRSALAMI M. Effects of Duo-Strain Probiotics on Growth, Digestion, and Gut Health in Broiler Chickens [J]. Veterinary and Animal Science, 2024, 24: 100343.
- [19] WANG Y, ZHANG C S, CHEN X, et al. Dietary Supplementation of Compound Probiotics to Improve Performance, Egg Quality, Biochemical Parameters and Intestinal Morphology of Laying Hens [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2024, 11: 1505151.
- [20] ZHANG X L, HU Y F, ANSARI A R, et al. Caecal Microbiota could Effectively Increase Chicken Growth Performance by Regulating Fat Metabolism [J]. Microbial Biotechnology, 2022, 15(3): 844-861.
- [21] 付文娟, 刘志伟, 黎茵, 等. 间型脉孢菌固体发酵产孢条件优化及其培养物对三黄鸡盲肠菌群结构的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(3): 35-42.
- [22] HANKEL J, JUNG K, KUDER H, et al. Caecal Microbiota of Experimentally *Campylobacter* Jejuni-Infected Chickens at Different Ages [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10(10): 2303.
- [23] FUJIO-VEJAR S, VASQUEZ Y, MORALES P, et al. The Gut Microbiota of Healthy Chilean Subjects Reveals a High Abundance of the Phylum Verrucomicrobia [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8(6): 1221.
- [24] LIU H, WANG J, HE T, et al. Butyrate: A Double-Edged Sword for Health [J]. Advances in Nutrition, 2018, 9(1): 21-29.
- [25] YIN Z C, JI S Y, YANG J T, et al. Cecal Microbial Succession and Its Apparent Association with Nutrient Metabolism in Broiler Chickens [J]. mSphere, 2023, 8(3): e00614-e00622.
- [26] LUO C W, WANG L Q, YUAN J M. Supplemental Enzymes and Probiotics on the Gut Health of Broilers Fed with a Newly Harvested Corn Diet [J]. Poultry Science, 2023, 102(7): 102740.
- [27] ZHAI Q X, FENG S S, ARJAN N, et al. A Next Generation Probiotic, *Akkermansia Muciniphila* [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(19): 3227-3236.