



枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡生长性能、肉品质及盲肠菌群多样性的影响

杨光, 赵亚慧, 刘叶青, 张高威, 王科, 卢欣宇, 苏湘谭, 孙佳乐, 陈纪薇, 高爱琴*

(内蒙古农业大学动物科学学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 旨在探究枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*, BS)和壳寡糖(Chitosan oligosaccharides, COS)对AA肉鸡生长性能、营养物质利用率、屠宰性能、肉品质及盲肠菌群多样性的影响。选取体重相近(46 ± 0.64 g)的1日龄肉仔鸡288只, 随机分为6个处理组, 每个处理6个重复, 每个重复8只鸡(公母各半)。其中对照组(CON)饲喂基础日粮, 试验组分别在饲喂基础饲料的基础上添加 5×10^9 CFU·kg⁻¹枯草芽孢杆菌(BS1组)、 6×10^9 CFU·kg⁻¹枯草芽孢杆菌(BS2组)、125 mg·kg⁻¹壳寡糖(COS组)、 5×10^9 CFU·kg⁻¹枯草芽孢杆菌+125 mg·kg⁻¹壳寡糖(MIX I组)、 6×10^9 CFU·kg⁻¹枯草芽孢杆菌+125 mg·kg⁻¹壳寡糖(MIX II组)。试验期42d。结果表明: 1) 1~21日龄, 与CON相比, MIX II组ADG极显著提高($P < 0.01$), 同时MIX II组FCR极显著提高($P < 0.01$)。22~42日龄, 与CON相比, MIX I组和MIX II组ADG极显著提高($P < 0.01$), 且MIX II组的FCR极显著提高($P = 0.01$)。2) 与CON相比, BS2组半净膛率、全净膛率显著提高($P < 0.05$)。3) 与CON相比, MIX I组肉鸡的粗蛋白利用率显著提高($P < 0.05$)。4) 与CON相比, pH_{45 min}、pH_{24 h}、剪切力、失水率、 L^* 、 a^* 、 b^* 各组之间均无显著差异($P > 0.05$), MIX I组胸肌滴水损失极显著增加($P < 0.01$), 而其腿肌滴水损失虽呈下降趋势, 但差异未达显著水平($P > 0.05$)。5) 与CON相比, COS组盲肠菌群Chao1、ACE和Shannon指数分别提高了0.13%、0.52%和1.56%, 但差异未达显著水平($P > 0.05$), COS组盲肠菌群Simpson指数降低了5.2%, 但整体差异性不显著($P > 0.05$)。BS2组在PC1轴上显著偏离其他处理组。BS1组、COS组、MIX I组与MIX II组距离接近且倾向于聚集, 重叠部分较多, 表明盲肠菌群组成结构相似。在门水平上, 与CON相比, MIX II组肉鸡盲肠菌群中拟杆菌门(Bacteroidetes)和疣微菌门(Verrucomicrobia)的相对丰度提高, BS1组肉鸡盲肠菌群中变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度提高; 在属水平上, 与CON相比, MIX II组肉鸡盲肠菌群中拟杆菌属(*Bacteroides*)和阿克曼菌属(*Akkermansia*)的相对丰度提高。综上所述, 饲料单独添加枯草芽孢杆菌或壳寡糖及二者联合添加在一定程度上可以促进肉鸡生长性能、改善肉品质, 增强盲肠内菌群多样性和丰富度, 保证肉鸡的健康生长。

关键词: 枯草芽孢杆菌; 壳寡糖; 营养物质利用率; 肉品质; 盲肠菌群

中图分类号: S831.5

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)03-1534-15

Effects of *Bacillus subtilis*, Chitosan Oligosaccharide and Their Combination on Growth Performance, Meat Quality and Cecal Microflora Diversity of Broilers

YANG Guang, ZHAO Yahui, LIU Yeqing, ZHANG Gaowei, WANG Ke, LU Xinyu,

SU Xiangtan, SUN Jiale, CHEN Jiwei, GAO Aiqin*

(College of Animal Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

收稿日期: 2025-03-13

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2023LHMS03064); 内蒙古农业大学动物科学学院高水平成果培育(CG202436)

作者简介: 杨光, 硕士生, 主要从事动物生产学研究, E-mail: yangguang_94@126.com

* 通信作者: 高爱琴, 主要从事动物产品安全生产研究, E-mail: gaoaiqin999@163.com

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of *Bacillus subtilis* (BS) and Chitosan oligosaccharides (COS) on growth performance, nutrient utilization, slaughter performance, meat quality and cecal microflora diversity of AA broilers. A total of 288 one-day-old broilers with similar body weight (46 ± 0.64 g) were randomly divided into 6 treatment groups with 6 replicates per treatment and 8 chickens per replicate (half male and half female). The control group (CON) was fed a basal diet, and the experimental groups were fed a basal diet supplemented with 5×10^9 CFU $\cdot$ kg $^{-1}$ *Bacillus subtilis* (BS1 group), 6×10^9 CFU $\cdot$ kg $^{-1}$ *Bacillus subtilis* (BS2 group), 125 mg $\cdot$ kg $^{-1}$ COS (COS group), 5×10^9 CFU $\cdot$ kg $^{-1}$ *Bacillus subtilis*+125 mg $\cdot$ kg $^{-1}$ COS (MIX I group), 6×10^9 CFU $\cdot$ kg $^{-1}$ *Bacillus subtilis*+125 mg $\cdot$ kg $^{-1}$ COS (MIX II group). The experiment lasted for 42 days. The results were showed as follows: 1) From 1 to 21 days of age, compared with CON, ADG in MIX II group was significantly increased ($P < 0.01$), and FCR in MIX II group was significantly increased ($P < 0.01$). At 22-42 days of age, compared with CON, ADG in MIX I and MIX II groups were significantly increased ($P < 0.01$). From 1 to 42 days of age, compared with CON, the ADG of MIX I and MIX II groups were significantly increased ($P < 0.01$), and the FCR of MIX II group was significantly increased ($P = 0.01$). 2) Compared with CON, the semi-eviscerated rate and eviscerated rate of BS2 group were significantly increased ($P < 0.05$). 3) Compared with CON, the crude protein utilization rate of broilers in MIX I group and COS group was significantly increased ($P < 0.05$). 4) Compared with CON, there was no significant difference in pH $_{45\text{ min}}$, pH $_{24\text{ h}}$, shear force, water loss rate, L^* , a^* or b^* among groups ($P > 0.05$). The drip loss of breast muscle in MIX I group was significantly increased ($P < 0.01$), but the drip loss of leg muscle showed a downward trend, and the difference was not significant ($P > 0.05$). 5) Compared with CON, the Chao1, ACE and Shannon index of cecal flora in COS group increased by 0.13%, 0.52% and 1.56%, respectively, but the difference was not significant ($P > 0.05$). The Simpson index of cecal flora in COS group decreased by 5.2%, but the overall difference was not significant ($P > 0.05$). The BS2 group was significantly deviated from the other treatment groups on the PC1 axis. BS1 group, COS group, MIX I group and MIX II group were close to each other and tended to gather, with more overlapping parts, indicating that the composition of cecal flora was similar. At the phylum level, compared with CON, the relative abundance of Bacteroidetes and Verrucomicrobia in the cecal flora of broilers in MIX II group increased, and the relative abundance of Proteobacteria in the cecal flora of broilers in BS1 group increased; at the genus level, compared with CON, the relative abundance of *Bacteroides* and *Akkermansia* in the cecal flora of broilers in MIX II group increased. In summary, dietary supplementation of *Bacillus subtilis* or Chitosan oligosaccharides alone or their combination can promote the growth performance, improve meat quality, enhance the diversity and richness of cecal flora, and ensure the healthy growth of broilers to a certain extent.

Keywords: *Bacillus subtilis*; Chitosan oligosaccharides; nutrients utilization; meat quality; cecal microbiota

* **Corresponding author:** GAO Aiqin, E-mail: gaoaiqin999@163.com

近几十年来,抗生素的长期、大量且不规范使用,不仅导致畜禽体内及其产品中出现药物残留问题^[1],还伴随着一系列耐药菌株的出现^[2],严重威胁消费者的健康。自我国2020年7月颁布饲料端的“禁抗令”以来,一些具有类似抗生素功能的益生菌

制剂因具有无毒、无害及无残留的优点成为目前研究的热点,并且已被证明具有代替饲用抗生素的潜力^[3]。枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*, BS)是一种革兰阳性芽孢杆菌,能够作为益生菌参与生物体的氮代谢平衡调控^[4]。其不仅能在机体肠道低氧环境

中通过乙酸、乳酸等短链脂肪酸的合成快速供能,缓解因病原感染或环境突变引发的代谢压力^[5],还能分泌中性蛋白酶、 α -淀粉酶等消化酶,通过分解饲料中的抗营养因子(如非淀粉多糖)优化肠道pH环境,保证肠道健康^[6]。壳寡糖(Chitosan Oligosaccharide, COS)又叫低聚壳聚糖、壳聚寡糖,是由甲壳素脱乙酰基的产物(壳聚糖)降解产生的物质^[7],其不仅具有增强机体抗氧化和免疫力、促进动物生长、改善肠道内环境的作用^[8],还可通过抑制线粒体ATP合酶活性及下调NF- κ B炎症通路,实现代谢调控与免疫平衡。目前,BS在畜禽上的研究较为广泛,众多研究表明,BS能够改善小肠的形态结构,提高机体的消化吸收效能^[9]。Al-Quwaie^[10]的研究发现,BS作为饲料添加剂可以显著改善肉鸡的生长性能和肠道健康。Lan等^[11]研究发现,在饲料中添加COS可以提高肉鸡的饲料转化率、增强肠道屏障功能。在植物领域,Yarullina等^[12]研究发现,BS与COS联合使用可显著增强马铃薯对晚疫病的抗性,通过激活多种防御相关酶和基因表达,发挥协同保护作用。然而,尽管BS和COS在各自领域的研究已取得一定进展,但二者在肉鸡上的联用效果尚未见系统报道。因此,本试验以白羽肉鸡为研究对象,探究BS和COS及二者联合添加对其生长性能、屠宰性能、肉品质和盲肠菌群多样性的影响,以期为BS和COS在肉鸡生产中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用枯草芽孢杆菌和壳寡糖均为市售产品。壳寡糖购自陕西纽芙生物科技有限公司,浓度98%,分子量 $<1\ 500$ u;枯草芽孢杆菌购自北海亦强生物科技有限公司,活菌数 1×10^{11} CFU $\cdot$ g⁻¹。

1.2 试验设计

本试验采用单因素完全随机设计,选取体重相近(46 ± 0.64 g)的健康1日龄爱拔益加(AA)白羽肉鸡288只,随机分成6个处理组,每个处理6个重复,每个重复8只鸡(公母各半)。其中对照组(CON)饲喂基础日粮,试验组分别在饲喂基础饲料的基础上添加 5×10^9 CFU $\cdot$ kg⁻¹枯草芽孢杆菌(BS1)、 6×10^9 CFU $\cdot$ kg⁻¹枯草芽孢杆菌(BS2)、 125 mg $\cdot$ kg⁻¹壳寡糖(COS)、 5×10^9 CFU $\cdot$ kg⁻¹枯草芽孢杆菌+ 125 mg $\cdot$ kg⁻¹壳寡糖(MIX I)、 6×10^9 CFU $\cdot$ kg⁻¹枯草芽孢杆菌+ 125 mg $\cdot$ kg⁻¹壳寡糖

(MIX II)。试验期42 d,分为1~21日龄和22~42日龄2个阶段。基础日粮按照NRC标准(1994)和《鸡饲养标准》(NY/T33—2004)配制,组成和营养水平见表1。

表1 日粮组成及营养成分

Table 1 Diet composition and nutrients

项目 Item	含量/% Content	
	1~21日龄 1-21 days of age	22~42日龄 22-42 days of age
原料 Ingredients		
玉米 Corn	58.95	60.90
豆油 Soybean oil	3.00	3.00
豆粕 Soybean meal	23.00	20.00
棉籽饼 Cottonseed cake	5.50	6.00
菜籽饼 Rapeseed cake	5.50	6.00
石粉 Limestone	1.07	1.22
食盐 NaCl	0.37	0.37
磷酸氢钙 CaHPO ₄	1.90	1.80
胆碱 Choline	0.11	0.11
复合多维 Vitamin premix ¹	0.10	0.10
矿物预混料 Mineral premix ²	0.50	0.50
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient level ³		
代谢能/(MJ $\cdot$ kg ⁻¹) ME	12.26	12.64
粗蛋白质 CP	21.07	19.38
钙 Ca	1.05	0.95
赖氨酸 L-Lysine	0.23	0.26
蛋氨酸 DL-Methionine	0.27	0.24
总磷 P	0.52	0.47
非植酸磷 NPP	0.37	0.32
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	0.82	0.71

¹. 每千克预混料提供维生素:VA 900 IU; VD₃ 3000 IU; VE 26 IU; VK₃ 1.20 mg; VB₁ 3.00 mg; VB₂ 8.00 mg; VB₆ 4.40 mg; VB₁₂ 0.012 mg; VB₃ 45 mg; VB₅ 15 mg; 叶酸 0.75 mg; 氯化胆碱 1 200 mg。². 每千克颗粒日粮提供矿物质:Fe 105 mg; Cu 10 mg; Zn 102 mg; Mn 118 mg; I 1.5 mg; Se 0.35 mg。³. 代谢能为计算值,其他为实测值

¹. Vitamins provided per kilogram of premix: VA 900 IU; VD₃ 3 000 IU; VE 26 IU; VK₃ 1.20 mg; VB₁ 3.00 mg; VB₂ 8.00 mg; VB₆ 4.40 mg; VB₁₂ 0.012 mg; VB₃ 45 mg; VB₅ 15 mg; folic acid 0.75 mg; choline chloride 1 200 mg.

². Minerals provided per kilogram of pelleted diet: Fe 105 mg; Cu 10 mg; Zn 102 mg; Mn 118 mg; I 1.5 mg; Se 0.35 mg.

³. Metabolizable energy was a calculated value, whereas all other values were measured

1.3 饲养管理和样品采集

饲养试验于内蒙古农业大学动物科学学院肉

鸡综合生产试验室进行,采用3层笼养,试验前对鸡舍设备进行打扫、消毒。试验第1周内温度维持33℃,随后每周降3℃至21℃时稳定温度,直至试验结束。舍内湿度保持50%~65%。所有肉鸡7日龄时接种新城疫疫苗,14日龄时接种传染性法氏囊和支气管二联苗。试验期间自由采食和饮水,保证通风和光照,每日监测鸡群健康状况并适时调整环境参数。

1.4 指标测定及方法

1.4.1 生长性能测定 分别于试验第21和42天,以重复为单位进行称重,试验期间每日记录采食量,计算1~21日龄、22~42日龄和1~42日龄肉鸡体重(BW)、平均日增重(ADG)、平均日采食量(ADFI)和饲料转化率(FCR)。

1.4.2 营养物质利用率的测定 代谢试验在肉鸡40~42日龄时进行,以每个处理组为单位进行试验,准确收集正试期3d的鸡排泄物,使用镊子剔除羽毛、饲料及其他杂质,暂放于密封袋中标记好,放在-20℃冰箱里保存。代谢试验结束后,将收集的样品进行混匀、烘干和粉碎,以便后续指标的测定。在干物质基础上测定饲料和粪便中粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分含量,具体测定方法见张丽英《饲料分析及饲料质量检测技术第4版》^[13]。

养分表现代谢率(%)=100-

$$100 \times \frac{(\text{粪中某养分含量} \times \text{饲料中酸不溶灰分含量})}{(\text{饲料中某养分含量} \times \text{粪中酸不溶灰分含量})}$$

1.4.3 屠宰性能的测定 屠宰试验进行前禁食8h,在42日龄时,每个重复随机选取1只肉鸡测定屠宰性能。屠宰性能参照杨宁主编的《家禽生产学》第二版^[14]进行测定,具体计算方法如下:

$$\text{屠宰率}(\%) = \frac{\text{屠体重}}{\text{活重}} \times 100;$$

$$\text{半净膛重}(\%) = \frac{\text{半净膛重}}{\text{活重}} \times 100;$$

$$\text{全净膛重}(\%) = \frac{\text{全净膛重}}{\text{活重}} \times 100;$$

$$\text{胸肌率}(\%) = \frac{\text{胸肌重}}{\text{全净膛重}} \times 100;$$

$$\text{腿肌率}(\%) = \frac{\text{腿肌重}}{\text{全净膛重}} \times 100;$$

$$\text{腹脂率}(\%) = \frac{\text{腹部脂肪重} + \text{肌胃外脂肪重}}{\text{全净膛重}} \times 100。$$

1.4.4 肉品质的测定 取“1.4.3”中屠宰后肉鸡的胸肌和腿肌,参考《畜禽肉质的测定》(NY/T 1333—2007)测定pH_{45min}、pH_{24h}、滴水损失、失水率、剪切力。使用色度计SMY-2000sf测定肉色,肉色参数包括亮度(L*)、红度(a*)和黄度(b*)。

滴水损失(%)=

$$\frac{\text{挂前肉样重} - \text{挂后肉样重}}{\text{挂前肉样重}} \times 100;$$

$$\text{失水率}(\%) = \frac{\text{总重} - \text{压后肉样重}}{\text{总重}} \times 100。$$

1.4.5 盲肠菌群的测定 将盲肠内容物样本干冰储存送至上海微基生物有限公司,对样品进行DNA提取和PCR扩增及测序。采用引物357F5'-ACTCCTACGGRAGGCAGCAG-3'和806R5'-GG-ACTACHVGGGTWTCTAAT-3'对样本的16S rRNA基因的16S V3-V4区域进行扩增。采用Illumina高通量测序平台对PCR产物进行高通量测序。采用Shannon指数、Simpson指数、Chao1指数和Observed_species指数计算α-多样性;利用相似性分析(ANOSIM)、多重响应置换法(MRPP)、置换多元方差分析(Adonis)和LEfSe等方法分析不同群体间群落结构的差异,得到β-多样性指数。

1.5 数据统计与分析

利用Excel(2016)对数据进行初步整理,运用SAS9.2软件对数据进行单因素方差分析,若差异显著,则采用LSD法进行多重比较。以P<0.05为差异显著标准。

2 结 果

2.1 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡生长性能的影响

由表2可知,1~21日龄,与CON相比,BS2组、COS组、MIX I组和MIX II组ADG极显著提高(P<0.01),同时MIX II组FCR极显著提高(P<0.01),BS1组和COS组的ADFI极显著提高(P<0.01)。22~42日龄,与CON相比,BS2组、COS组、MIX I组和MIX II组BW极显著提高(P<0.01),且MIX I组和MIX II组ADG极显著提高(P<0.01)。1~42日龄,与CON相比,MIX I组和MIX II组的ADG极显著提高(P<0.01),且MIX II组的FCR极显著提高(P=0.01)。

表 2 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡生长性能的影响

Table 2 Effects of *Bacillus subtilis* and chitosan oligosaccharide and their combined additions on the growth performance of broilers

项目 Item	对照组 CON	枯草 1 组 BS1	枯草 2 组 BS2	壳寡糖组 COS	混合 I 组 MIX I	混合 II 组 MIX II	P 值 P-value
1~21 日龄 1-21 days							
体重/g BW	45.95±0.11	45.95±0.09	46.06±0.13	45.99±0.11	46.07±0.07	46.00±0.08	0.180
平均日增重/(g·d ⁻¹) ADG	42.92±1.04 ^b	43.32±0.34 ^b	44.05±0.66 ^a	44.06±0.54 ^a	44.87±0.59 ^a	44.32±0.49 ^a	0.005
平均日采食量/(g·d ⁻¹) ADFI	59.20±0.76 ^b	62.26±1.34 ^a	61.26±1.29 ^b	62.20±0.93 ^a	62.02±1.19 ^b	56.95±1.12 ^b	0.002
饲料转化率 FCR	0.73±0.02 ^b	0.70±0.01 ^b	0.72±0.01 ^b	0.71±0.02 ^b	0.72±0.02 ^b	0.78±0.01 ^a	0.006
22~42 日龄 22-42 days							
体重/g BW	947.31±21.93 ^b	955.73±7.14 ^b	971.12±13.62 ^a	976.23±11.21 ^a	988.29±12.47 ^a	976.63±10.23 ^a	0.003
平均日增重/(g·d ⁻¹) ADG	84.26±1.42 ^b	84.57±1.75 ^b	83.60±3.25 ^b	82.55±1.18 ^b	85.71±3.51 ^a	85.68±7.64 ^a	0.005
平均日采食量/(g·d ⁻¹) ADFI	167.39±2.37	172.35±1.89	166.71±1.89	173.91±2.20	177.48±2.25	168.29±2.44	0.690
饲料转化率 FCR	0.50±0.01	0.49±0.01	0.50±0.02	0.47±0.01	0.48±0.02	0.51±0.05	0.160
1~42 日龄 1-42 days							
体重/g BW	2 716.77±29.32	2 731.67±35.17	2 726.79±62.54	2 704.73±24.32	2 788.12±78.21	2 775.91±163.27	0.420
平均日增重/(g·d ⁻¹) ADG	63.59±0.70 ^b	63.95±0.83 ^b	63.83±1.48 ^b	63.30±0.59 ^b	65.29±1.86 ^a	65.00±3.88 ^a	0.006
平均日采食量/(g·d ⁻¹) ADFI	114.78±1.83	118.46±1.86	115.29±1.95	119.37±1.72	121.16±1.77	113.91±1.65	0.420
饲料转化率 FCR	0.54±0.01 ^b	0.55±0.01 ^b	0.55±0.02 ^b	0.53±0.01 ^b	0.54±0.01 ^b	0.57±0.03 ^a	0.010

同行数据后所标字母相异表示差异显著 ($P<0.05$), 所标字母相同表示差异不显著 ($P>0.05$)。下表同Different letters in the same row means significant difference between the treatments ($P<0.05$), same letter in the same row means no significant difference between treatments ($P>0.05$). The same as below

2.2 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡屠宰性能的影响

由表3可知,与CON相比,BS2组半净膛率、全净膛率显著提高($P<0.05$)。

表3 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡42 d屠宰性能的影响

Table 3 Effects of *Bacillus subtilis* and chitosan oligosaccharide and their combined additions on the slaughter performance of broilers at 42 days

项目 Item	对照组 CON	枯草1组 BS1	枯草2组 BS2	壳寡糖组 COS	混合I组 MIX I	混合II组 MIX II	P值 P-value
半净膛 Half-eviscerated rate	82.01±0.85 ^a	83.63±0.57 ^b	83.83±1.50 ^b	83.80±0.67 ^{bc}	83.30±1.99 ^b	83.77±0.76 ^{bc}	0.042
全净膛率 Full-eviscerated rate	68.86±0.64 ^a	69.36±0.83 ^b	69.74±0.89 ^b	69.09±0.89 ^b	69.45±0.90 ^b	69.67±0.83 ^{bc}	0.029
胸肌率 Breast muscle rate	27.46±1.05	27.13±1.03	27.83±1.20	27.06±1.93	27.15±1.70	27.26±0.84	0.956
腿肌率 Thigh muscle rate	21.28±1.43	21.29±1.45	21.05±2.48	21.70±1.77	21.92±1.33	21.30±1.59	0.942
腹脂率 Abdominal fat rate	1.61±0.83	1.74±0.81	2.22±1.13	1.49±0.55	1.27±0.67	1.47±0.91	0.479

表4 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡42 d营养物质利用率的影响

Table 4 Effects of *Bacillus subtilis* and chitosan oligosaccharide and their combined additions on the apparent metabolic rate of nutrients in broilers at 42 days

项目 Item	对照组 CON	枯草1组 BS1	枯草2组 BS2	壳寡糖组 COS	混合I组 MIX I	混合II组 MIX II	P值 P-value
粗蛋白 CP	65.20±0.90 ^b	66.92±0.73 ^b	66.57±0.62 ^b	67.31±0.78 ^b	67.50±0.46 ^a	66.55±1.12 ^b	0.023
粗脂肪 EE	63.35±0.01	64.38±0.02	63.27±0.01	64.41±0.16	62.34±0.06	63.31±0.02	0.729
粗灰分 Ash	11.58±0.16	10.70±0.68	11.78±25	11.66±0.19	11.44±0.11	11.36±0.09	0.154

2.4 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡肉品质的影响

由表5可知,与CON相比,pH_{45 min}、pH_{24 h}、剪切力、失水率、 L^* 、 a^* 、 b^* 各组之间均无显著差异($P>0.05$),MIX I组胸肌滴水损失极显著提高($P<0.01$),而其腿肌滴水损失虽呈下降趋势,但差异未达显著水平($P>0.05$)。

2.5 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡盲肠菌群的影响

2.5.1 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对42d肉鸡盲肠菌群多样性的影响 由表6可知,与CON相比,COS组盲肠菌群Chao、ACE和Shannon指数分别提高了0.13%、0.52%和1.56%,但差异

2.3 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡营养物质利用率的影响

由表4可知,与CON相比,MIX I组肉鸡的粗蛋白利用率显著提高($P<0.05$)。

未达显著水平($P>0.05$),COS组盲肠菌群Simpson指数降低了5.2%,但整体差异性不显著($P>0.05$)。

由图1可知,根据主坐标分析(PCoA)发现其中主成分1(PC1)、主成分2(PC2)对样品差异的贡献值分别为40.23%、11.04%。BS2组在PC1轴上显著偏离其他处理组。BS1组、COS组、MIX I组与MIX II组距离接近且倾向于聚集在一起,重叠部分较多,表明盲肠菌群组成结构相似。

2.5.2 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡42 d盲肠微生物门属水平丰度的影响 由表7可知,在门水平上,肉鸡盲肠微生物以拟杆菌门、厚壁菌门、疣微菌门、变形菌门及无壁菌门为主,其中

表 5 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对 42 d 肉鸡肉品质的影响

Table 5 Effects of *Bacillus subtilis* and chito-oligosaccharide and their combined additions on the quality of broiler meat at 42 days

项目 Item	对照组 CON	枯草 1 组 BS1	枯草 2 组 BS2	壳寡糖组 COS	混合 I 组 MIX I	混合 II 组 MIX II	P 值 P-value
胸肌 Pectoralis							
pH _{45 min}	6.20±0.21	6.32±0.08	6.21±0.52	6.27±0.26	6.34±0.06	6.32±0.15	0.907
pH _{24 h}	6.07±0.08	6.18±0.18	6.10±0.17	6.06±0.15	6.01±0.17	5.96±0.08	0.242
剪切力/N Shear force	2.68±0.17	2.53±0.06	2.46±0.24	2.57±0.17	2.45±0.23	2.38±0.21	0.216
失水率/% Water loss rate	29.4±0.83	27.5±0.52	28.0±0.96	27.6±0.94	27.1±0.89	27.1±0.64	0.185
滴水损失/% Drip loss	2.24±0.40 ^a	2.44±0.65 ^b	2.49±0.71 ^c	2.56±0.53 ^c	2.35±0.46 ^b	2.41±0.41 ^b	0.005
亮度 L^*	43.4±4.25	45.0±3.81	45.2±3.34	47.6±2.65	47.1±2.95	46.9±2.76	0.992
红度 a^*	6.62±0.32	6.55±0.55	6.34±0.43	6.77±0.92	6.63±0.85	6.50±0.43	0.754
黄度 b^*	14.4±0.97	14.5±0.78	14.6±0.58	14.3±0.97	14.5±0.96	16.2±0.67	0.691
腿肌 Thigh muscle							
pH _{45 min}	6.27±0.20	6.32±0.05	6.29±0.11	6.29±0.11	6.33±0.06	6.27±0.23	0.978
pH _{24 h}	6.32±0.31	6.35±0.11	6.13±0.18	6.29±0.22	6.34±0.14	6.32±0.32	0.568
剪切力/N Shear force	2.62±0.24	2.46±0.14	2.53±0.22	2.46±0.14	2.48±0.12	2.58±0.17	0.517
失水率/% Water loss rate	28.1±0.80	27.1±0.73	27.8±0.91	27.1±0.93	26.7±0.95	27.8±0.96	0.788
滴水损失/% Drip loss	2.30±0.43	2.36±0.69	2.41±0.73	2.21±0.44	1.97±0.60	2.08±0.44	0.063
亮度 L^*	47.3±3.22	47.0±5.01	48.5±3.60	48.8±2.62	48.4±1.93	49.8±4.29	0.818
红度 a^*	8.74±0.37	8.99±0.08	8.79±0.43	8.61±0.14	8.61±0.23	8.36±0.26	0.061
黄度 b^*	15.4±0.85	15.7±0.94	15.6±0.64	15.7±0.70	15.4±0.98	15.5±0.94	0.983

表 6 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡 42 d 盲肠微生物 α -多样性指数Table 6 *Bacillus subtilis* and chito-oligosaccharide and their combined addition on the microbial α -diversity index of the cecum in broilers at 42 days

项目 Item	对照组 CON	枯草 1 组 BS1	枯草 2 组 BS2	壳寡糖组 COS	混合 I 组 MIX I	混合 II 组 MIX II	P 值 P-value
Chao 1	511.83	486.76	491.08	512.51	499.57	495.02	0.613
ACE	506.87	473.79	489.36	509.53	499.02	488.15	0.324
Shannon	3.81	3.55	3.81	3.87	3.75	3.75	0.405
Simpson	0.06	0.08	0.06	0.06	0.07	0.07	0.503

拟杆菌门、厚壁菌门和疣微菌门为优势菌种,占微生物菌落总数的 96% 以上,其中拟杆菌门在各组中丰度最高。由图 2 可知,在门水平上,与 CON 相比,MIX II 组肉鸡盲肠菌群中拟杆菌门和疣微菌门相对丰度提高,BS1 组肉鸡盲肠菌群中变形菌门相对丰度提高。

由表 8 可知,在属水平上,拟杆菌属、另枝菌属、阿克曼菌属是各组内的优势菌种,占菌群总数 57% 以上。由图 3 可知,在属水平上,与 CON 相比,MIX II 组肉鸡盲肠菌群中拟杆菌属和阿克曼菌属的相对丰度提高。

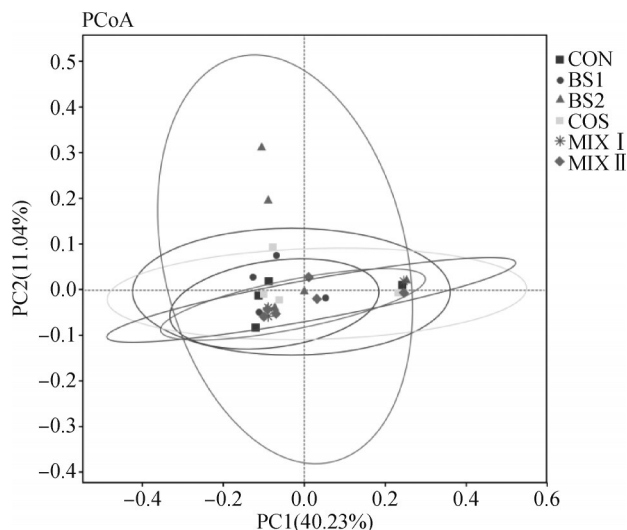


图1 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡42 d盲肠微生物PCoA聚类圈分析图

Fig. 1 *Bacillus subtilis* and chito-oligosaccharide and their combined addition on the 42-day cecal microbial PCoA cluster analysis of broilers

3 讨 论

3.1 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡生长性能和屠宰性能的影响

生长性能是反映畜禽生长发育速率的重要指标,直接影响养殖收益^[15]。已有研究发现,单独添加BS或COS均能使畜禽生长性能得到不同程度的提高^[3,16]。Soghomonyan等^[17]研究发现,BS通过分

泌 α -淀粉酶和脂肪酶增强雏鸡对日粮碳水化合物的分解效率,而COS通过上调空肠黏膜occludin蛋白表达改善肠道屏障功能^[16],两者共同促进营养吸收。生长性能的提升可能反映了肠道环境的改善,从而为有益菌群的定植和生长提供了更有利的条件。本试验研究发现,在1~21日龄阶段,MIX II组肉鸡的ADG极显著提高($P<0.01$),这一结果与邢迪^[19]的研究一致。值得注意的是,BS1组肉鸡在此阶段FCR降低,这可能归因于BS对产气荚膜梭菌的竞争性抑制^[20],从而减少肠道炎症导致的能量损耗。在22~42日龄阶段,MIX I组和MIX II组ADG极显著提高($P<0.01$),可能与BS持续调节胃泌素(ghrelin)分泌有关^[21],这与史宇涛等^[22]的结论相符,研究发现,这可能是由于COS通过促进盲肠有益菌增殖,提高了日粮粗蛋白利用率^[23]。本试验全期数据显示,混合组的ADG增长程度显著高于单一添加剂组,且MIX II组FCR显著提高,这支持了Çinar等^[24]提出的“菌-元协同效应”假说:BS代谢产生的短链脂肪酸(SCFAs)可激活COS的TLR4/NF- κ B信号通路,形成肠道免疫与代谢的正反馈调节。在本试验中,MIX II组的盲肠菌群中拟杆菌门和疣微菌门的相对丰度显著提高。这些菌群能够分解复杂碳水化合物,产生SCFAs,为宿主提供能量,从而进一步促进生长。此外,本试验生长性能仅在1~21日龄有提高作用,推测原因可能是随着肉鸡的生长,添加剂水平也应随之调整。

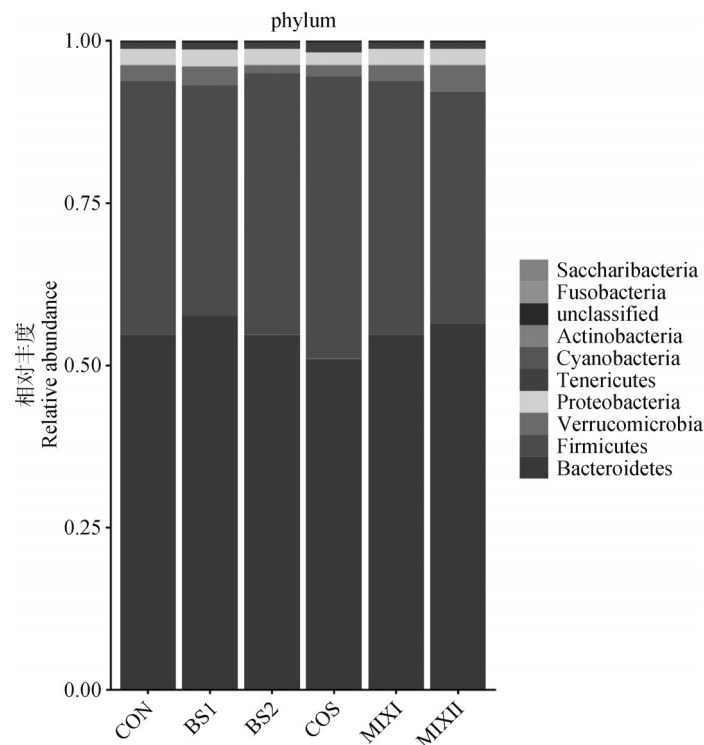
表7 门水平物种分布柱状图分组均值

Table 7 Phylum horizontal species distribution histogram grouped mean

项目 Item	对照组 CON	枯草1组 BS1	枯草2组 BS2	壳寡糖组 COS	混合I组 MIX I	混合II组 MIX II
拟杆菌门 Bacteroidetes	0.55	0.60	0.55	0.51	0.55	0.56
厚壁菌门 Firmicutes	0.39	0.33	0.40	0.43	0.39	0.36
疣微菌门 Verrucomicrobia	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04
变形菌门 Proteobacteria	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
无壁菌门 Tenericutes	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

屠宰性能是衡量养殖周期内经济效益的关键指标,通过对比不同养殖技术或饲料对屠宰性能的影响,可以清晰地评估养殖成本与收益之间的关系^[25]。闫冰雪^[26]研究发现,BS对肉鸡的全净膛率、半净膛率、腹脂率以及胸腿肉中的脂肪、肌苷酸、单不饱和和脂肪酸都有明显影响。孙玲玲等^[27]研究表明,添加BS可以降低肉鸡腹脂率,提高胸肌率与腿

肌率。本试验结果表明,BS2组能够显著提高肉鸡半净膛率与全净膛率。郭瑞萍等^[28]研究发现,添加BS能够提高肉鸡屠宰率、半净膛率、全净膛率,这与本研究结果一致。其原因可能是BS作为好氧菌在肠道内形成酸性厌氧环境,使肠道中的有益厌氧菌生长定植,改善肠道内环境平衡,在一定程度促进了肉鸡肌胃和肠道的发育,提高了肉鸡对营养物质



Bacteroidetes. 拟杆菌门;Firmicutes. 厚壁菌门;Verrucomicrobia. 疣微菌门;Proteobacteria. 变形菌门;Tenericutes. 无壁菌门;Cyanobacteria. 蓝藻;Actinobacteria. 放线菌门;Unclassified. 未分类菌门;Fusobacteria. 梭杆菌门;Saccharibacteria. 糖杆菌门

图2 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡42 d盲肠菌群门水平上微生物相对丰度柱形图

Fig. 2 Histogram of the relative abundance of microorganisms at the phylum level of cecal microbiota in broilers with their combined addition at 42 days

表8 属水平物种分布柱状图分组均值

Table 8 Histogram grouping mean of genus horizontal species distribution

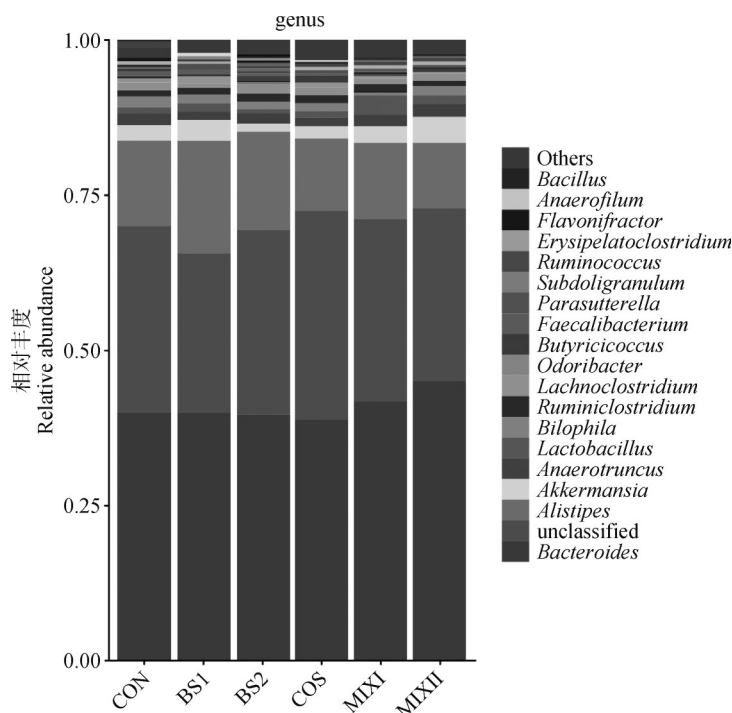
项目 Item	对照组 CON	枯草1组 BS1	枯草2组 BS2	壳寡糖组 COS	混合Ⅰ组 MIX I	混合Ⅱ组 MIX II
拟杆菌属 <i>Bacteroides</i>	0.40	0.40	0.40	0.39	0.42	0.45
未分类菌属 <i>Unclassified</i>	0.30	0.25	0.31	0.33	0.29	0.28
另枝菌属 <i>Alistipes</i>	0.14	0.18	0.15	0.12	0.12	0.11
阿克曼菌属 <i>Akkermansia</i>	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04

的消化吸收利用,使得机体对养分消化吸收能力增强,进而达到改善屠宰性能的目的。

3.2 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡营养物质利用率的影响

营养物质利用率是衡量肉鸡对饲料营养成分吸收利用的效率以及整体健康状态的重要指标之一^[29]。通过优化肉鸡对饲料营养物质的吸收和转化能力,不仅可以降低养殖成本,还能显著提高养殖的经济效益^[30]。郑建婷等^[31]研究发现,在日粮中添加BS能够通过改善肠道内环境来增强机体对养分的吸收能力。Singh等^[32]研究发现,BS能够

提高肉鸡对粗蛋白质的利用率。闫冰雪^[26]研究发现,在肉鸡饲料中添加COS可提高粗蛋白利用率。在本试验中,MIX I组肉鸡的粗蛋白利用率显著提高,这与Singh等^[32]和闫冰雪^[26]的研究结果一致,这可能是由于BS能分泌多种活性较高的酶,如蛋白酶、植酸酶、纤维素酶和非淀粉多糖酶等^[33]。这些酶可以有效降低饲料中抗营养因子的负面影响,从而提高蛋白质和氨基酸的消化率^[34]。同时,COS可以刺激肠道,调节肠道微生物菌群分布,促进小肠微绒毛的生长,通过增加小肠的吸收面积等,改善动物生长性能和产品品质,提高饲料利用率^[35]。



Bacteroides. 拟杆菌属;Unclassified. 未分类菌属;*Alistipes*. 另枝菌属;*Akkermansia*. 阿克曼菌属;*Anaerotruncus*. 厌氧杆菌属;*Lactobacillus*. 乳杆菌属;*Bilophila*. 嗜胆菌属;*Ruminiclostridium*. 瘤胃菌属;*Lachnospirillum*. 乳酸菌属;*Odoribacter*. 臭杆菌属;*Butyrivibrio*. 布特里球菌属;*Faecalibacterium*. 粪杆菌属;*Parasutterella*. 帕拉苏特氏菌属;*Subdoligranulum*. 罕见小球菌属;*Ruminococcus*. 瘤胃球菌属;*Erysipelatoclostridium*. 丹毒杆菌属;*Flavonifractor*. 解黄酮菌属;*Anaerofilum*. 杆状细胞属;*Bacillus*. 芽孢杆菌属

图3 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡42 d盲肠菌群属水平上微生物相对丰度柱形图

Fig. 3 Histogram of the relative abundance of microorganisms at the genus level of cecal flora in broilers with addition of *Bacillus subtilis* and chito-oligosaccharides and their combined additions at 42 d

3.3 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡肉品质的影响

肉品质是评价家禽肉用性能的核心,常规指标包括肉色、剪切力、滴水损失和pH等^[36]。肉色是肌肉外观的颜色特征,受肌红蛋白和血红蛋白含量影响^[37],常用 L^* 、 a^* 、 b^* 表示。 a^* 数值越高,肉色越红,新鲜程度越高^[38]。王喜峰^[3]研究发现,添加BS可以显著提高肉色 a^* 值。李阳^[39]研究发现,饲料中添加COS可显著提高肉鸡胸肌的 a^* 。而魏琳琳等^[40]研究发现,在肉鸡饲料中添加COS对肉色并没有显著影响,这与本试验结果一致。以上研究结果的差异可能是由于饲养管理及环境因素所致。

pH是衡量肌糖原降解速率的重要指标,同时也与肌肉蛋白的保水能力密切相关,进而影响肉的嫩度、系水力和货架期^[41]。剪切力是反映肌肉嫩度的关键指标,其值越小代表肉质越嫩。Mohammed等^[42]研究发现,饲料中添加BS能提高鸡肉的系水能力,降低剪切力。失水率和滴水损失是衡量肌肉

锁水能力的重要指标^[43]。本研究发现,BS和COS单一添加或联用均显著增加胸肌的滴水损失,这可能和BS和COS能增加胸肌中的多不饱和脂肪酸(PUFA)有关。郭瑞萍等^[28]和李阳^[39]发现,BS和COS均能增加肉鸡胸肌中PUFA含量,而PUFA的增加会使脂质过氧化反应增加,导致肌细胞膜被破坏,肌肉系水力降低,滴水损失增加^[44]。然而,Wang等^[45]的研究结果与本试验相反,他们发现饲料中添加COS具有降低鸡肉滴水损失的效果。这种差异可能和两个试验使用的COS分子量不同有关。本试验使用的COS分子量 $<1\ 500\ u$,而Wang等^[45]的试验中,分子量为 $2\ 400\ u$ 和 $3\ 600\ u$ 的COS显著降低了肉鸡肌肉滴水损失。有研究发现,分子量较大的壳寡糖(如 $2\ 400\sim 3\ 600\ u$)在降低肌肉滴水损失方面效果更优,而低分子量COS($<1\ 500\ u$)可能会通过改变肌肉细胞膜通透性或促进糖酵解途径,导致滴水损失增加^[46-47]。这可能是本试验中添加COS的肉鸡胸肌滴水损失增加的一个重要因

素。此外,本研究还观察到 MIX I 和 MIX II 组腿肌滴水损失相对于 CON 组呈现降低趋势,这种不同部位肌肉的结果差异可能说明 BS 和 COS 联用对不同性质的肌肉影响机制不同。胸肌主要由快肌纤维组成,代谢速率较高,其肌原纤维蛋白结构相对不稳定,更容易在屠宰后发生收缩,导致水分流失^[48];而腿肌含有更多慢肌纤维,代谢速率较低^[49]。BS 和 COS 联用可能导致快肌收缩更强而慢肌收缩更慢,进而导致了这种差异现象。

3.4 枯草芽孢杆菌和壳寡糖及其联合添加对肉鸡盲肠微生物群多样性的影响

肉鸡盲肠中的大量微生物在调节肠道健康、促进营养物质的消化、吸收和利用、调控免疫功能等方面发挥着重要的作用^[50],其菌群结构的平衡能够促进肉鸡对营养物质的消化吸收,并有助于维持机体健康^[51]。微生物菌群的多样性常用 α -多样性和 β -多样性指数表示。Chao1 指数、ACE 指数越高,表示群落的丰富度越高;Shannon 指数越高,表示群落的多样性越高;Simpson 指数越大,表示优势菌群所占比重越大。本试验中,COS 组肉鸡盲肠微生物丰度指数及多样性指数增加,但差异不显著,表明 COS 的添加可在一定程度上影响早期肉鸡盲肠微生物群丰度及多样性,但可能不是影响肉鸡盲肠菌落丰度和多样性的重要因素。 β -多样性用于比较不同样本之间微生物群落组成的差异性。在 β -多样性分析中,PCoA 是基于 Bray-Curtis 距离来进行分析,用于可视化不同处理组肉鸡盲肠菌群的整体结构差异,聚集在一起的样本表明菌群结构相似度高,而相似度低的样品则会远远分散^[52]。本试验研究发现,BS2 组的离散分布可能与其样本量不足及独有菌种(解黄酮菌)的调控作用有关。COS 组的组内聚集性与其较高的 α -多样性一致,推测糖类添加剂可能通过促进菌群均一化从而增强肠道稳态。

在门水平上,厚壁菌门和拟杆菌门可产生分解多糖的酶类,帮助机体分解多糖类物质,促进营养物质的消化吸收^[53]。本研究显示,拟杆菌门、厚壁菌门和疣微菌门是盲肠内的主要菌群,占微生物群落总数的 96% 以上,其中拟杆菌门为优势菌群。部分研究表明,肉鸡盲肠微生物菌群中的优势菌门为厚壁菌门^[54];然而,也有研究指出拟杆菌门是肉鸡盲肠菌群的优势菌门^[55]。张雪^[56]研究发现,42 日龄肉鸡盲肠中拟杆菌门为优势菌门,这与本研究结果一致。与 CON 相比,MIX II 组中拟杆菌门和疣微

菌门的相对丰度显著提高。拟杆菌门是肉鸡盲肠中的主要纤维素分解菌,而疣微菌门中的阿克曼菌属已被证实具有改善肠道屏障功能的作用,其丰度的增加可能与 BS 和 COS 的协同作用有关。此外,BS1 组中变形菌门丰度升高,推测添加剂剂量可能对微生物平衡具有阈值效应^[57]。

在属水平上,本研究结果显示,拟杆菌属、另枝菌属和阿克曼菌属是各组内的优势菌属,占菌群总数的 57% 以上。其中,拟杆菌属能够分解纤维素并产生短链脂肪酸(SCFAs),其丰度增加可能通过丁酸等代谢产物调节宿主能量代谢^[58];而阿克曼菌属的增殖则可能通过激活 Toll 样受体(TLR)信号通路,进而增强肠道免疫应答^[59]。与 CON 相比,MIX II 组中拟杆菌属和阿克曼菌属的相对丰度提高,这可能源于 BS 与 COS 的协同作用:前者通过代谢产物调节肠道 pH,创造有益菌群定植环境;后者作为益生元促进有益菌增殖。上述结果表明,BS 与 COS 联用对肉鸡盲肠菌群的结构优化具有一定协同效应,为开发新型饲料添加剂组合提供了理论依据。

4 结 论

本试验结果表明,饲料中添加 BS、COS 以及二者联合添加均可促进肉鸡生长,改善肉质和肠道健康。然而,从整体效果来看,混合组(二者联合添加)的表现优于单一添加组,说明联合添加的效果更为显著。

参考文献:

- [1] GAGGIÀ F, MATTARELLI P, BIAVATI B. Probiotics and prebiotics in animal feeding for safe food production[J]. *Int J Food Microbiol*, 2010, 141(1): S15-S28.
- [2] SING S, MAYER E, 邸超,等. 家禽生产中抗生素耐药性的挑战[J]. 中国家禽, 2011, 33(19): 50-52. SING S, MAYER E, DI C, et al. Challenges of antibiotic resistance in poultry production[J]. *China Poultry*, 2011, 33(19): 50-52. (in Chinese)
- [3] 王喜峰. 枯草芽孢杆菌和乳酸菌对热应激肉鸡生产性能、肉质、免疫器官和盲肠菌群的影响[D]. 滁州: 安徽科技学院, 2020. WANG X F. Effects of *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus* on production performance, meat quality, immune organs and cecal microbe of heat-stressed broilers[D]. Chuzhou:

- Anhui Science and Technology University, 2020. (in Chinese)
- [4] HE H, LI Y, ZHANG L, et al. Understanding and application of *Bacillus* nitrogen regulation: A synthetic biology perspective[J]. *J Adv Res*, 2023, 49: 1-14.
- [5] 李新科, 杨 雪, 张 萱, 等. 短链脂肪酸对肠道屏障保护作用的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(8): 4861-4871.
- LI X K, YANG X, ZHANG X, et al. Research Progress on Protective Effects of Short Chain Fatty Acids on Intestinal Barrier [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(8): 4861-4871. (in Chinese)
- [6] 张传丽, 李同祥, 杨 凡, 等. 产淀粉酶和蛋白酶芽孢杆菌的筛选鉴定及其酶学性质分析[J]. *中国酿造*, 2023, 42(12): 110-116.
- ZHANG C L, LI T X, YANG F, et al. Screening and identification of amylase-and protease-producing *Bacillus* and their enzymatic property analysis [J]. *China Brewing*, 2023, 42(12): 110-116. (in Chinese)
- [7] 白 洁. 饲料添加壳寡糖对肉鸡生产性能、免疫性能、抗氧化性能及肠道发育的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- BAI J. Effects of Chitosan oligosaccharide supplementation on production performance, immune performance, serum antioxidant activity and intestinal development in broilers [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [8] TOMIDA H, FUJII T, FURUTANI N, et al. Antioxidant properties of some different molecular weight chitosans[J]. *Carbohydr Res*, 2009, 344(13): 1690-1696.
- [9] MIN Y, YANG H, XU Y, et al. Effects of dietary supplementation of synbiotics on growth performance, intestinal morphology, sIgA content and antioxidant capacities of broilers[J]. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 2016, 100(6): 1073-1080.
- [10] AL-QUWAIE D A. The influence of bacterial selenium nanoparticles biosynthesized by *Bacillus subtilis* DA20 on blood constituents, growth performance, carcass traits, and gut microbiota of broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2023, 102(9): 102848.
- [11] LAN R, WU F, WANG Y, et al. Chitosan oligosaccharide improves intestinal function by promoting intestinal development, alleviating intestinal inflammatory response, and enhancing antioxidant capacity in broilers aged d 1 to 14[J]. *Poult Sci*, 2023, 103(2): 103381.
- [12] YARULLINA L, BURKHANOVA G, TSVETKOV V, et al. Stimulation of the protective mechanisms of *Solanum tuberosum* by the bacteria *Bacillus subtilis* and Chito-oligosaccharides upon infection with phytophthora infestans[J]. *Appl Biochem Microbiol*, 2022, 58(2): 166-174.
- [13] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术 第4版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- ZHANG L Y. Feed analysis and feed quality testing technology 4th ed [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 杨 宁. 家禽生产学 第2版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- YANG N. Poultry Science 2nd ed [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 刘叶青. 枯草芽孢杆菌和壳寡糖对肉鸡抗氧化、免疫和肠道屏障功能的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- LIU Y Q. Effects of *Bacillus subtilis* and chito-oligosaccharides on antioxidant, immune and intestinal barrier function in broilers [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [16] 黄金贵, 张 勇, 李方方, 等. 包被屎肠球菌、枯草芽孢杆菌及其复合菌对肉鸡生长性能、屠宰性能及肠道功能的影响[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(7): 4370-4386.
- HUANG J G, ZHANG Y, LI F F, et al. Effects of encapsulated *Enterococcus faecium*, *Bacillus subtilis* and their complex bacteria on growth performance, slaughter performance and intestinal function of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(7): 4370-4386. (in Chinese)
- [17] SOGHOMONYAN T, HAMBARDZUMYAN A, MKHITARYAN A, et al. Obtaining and characterizing thermostable α -amylases secreted by *Bacillus subtilis*, originating from *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus subtilis*[J]. *Fermentation*, 2024, 10(11): 547-547.
- [18] 王浩轩, 张 迦, 兰瑞霞. 壳寡糖对肠道黏膜屏障功能保护作用的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(11): 6917-6928.
- WANG H X, ZHANG J, LAN R X. Research progress on protective effects of chitosan oligosaccharides on intestinal mucosal barrier function[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(11): 6917-6928. (in Chinese)
- [19] 邢 迪. 枯草芽孢杆菌—壳聚糖的合生素对肉鸡生产性能及免疫功能的研究[D]. 北京: 中国农业科学

- 院, 2013.
- XING D. Research of synbiotics of *B. Subtilis*-Chitosan effect on broilers's productivity& immunity [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- [20] JAYARAMAN S, THANGAVEL G, KURIAN H, et al. *Bacillus subtilis* PB6 improves intestinal health of broiler chickens challenged with *Clostridium perfringens*-induced necrotic enteritis[J]. *Poult Sci*, 2013, 92(2): 370-374.
- [21] QIU K, LI C, WANG J, et al. Effects of dietary supplementation with *Bacillus subtilis*, as an alternative to antibiotics, on growth performance, serum immunity, and intestinal health in broiler chickens[J]. *Front Nutr*, 2021, 8: 786878.
- [22] 史宇涛, 马志鹏, 张俊梅, 等. 壳寡糖对白羽肉鸡生长性能及血清生化指标和肠道形态的影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(3): 8-12, 22.
- SHI Y T, MA Z P, ZHANG J M, et al. Effect of chitooligosaccharides on growth performance, serum biochemical indices and intestinal morphology of broilers[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2020, 39(3): 8-12, 22. (in Chinese)
- [23] ZHANG J, CAI K, MISHRA R, et al. In ovo supplementation of chitooligosaccharide and chlorella polysaccharide affects cecal microbial community, metabolic pathways, and fermentation metabolites in broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2020, 99(10): 4776-4785.
- [24] ÇINAR M, ÇATLI A, BOZKURT M, et al. The effect of single or combined dietary supplementation of prebiotics, organic acid and probiotics on performance and slaughter characteristics of broilers [J]. *S Afr J Anim Sci*, 2009, 39(3): 197-205.
- [25] FANG J, CAO Y, MATSUZAKI M, et al. Effects of apple pomace-mixed silage on growth performance and meat quality in finishing pigs[J]. *Anim Sci J*, 2016, 87(12): 1516-1521.
- [26] 闫冰雪. 壳寡糖对肉仔鸡生产性能、屠宰性能、免疫指标及骨骼参数的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- YAN B X. Effect of chitooligosaccharide on the growth performance, carcass traits, immunologic function and bone parameters of broiler chickens [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [27] 孙玲玲, 王宝维, 龙建华, 等. 饲料中添加枯草芽孢杆菌和丁酸梭菌对五龙鹅雏鹅生长性能、屠宰性能、血清生化指标及抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(11): 4642-4649.
- SUN L L, WANG B W, LONG J H, et al. Effects of dietary *Bacillus subtilis* and *Clostridium butyricum* on growth performance, slaughter performance, serum biochemical indices and antioxidant capacity of Wulong goslings [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(11): 4642-4649. (in Chinese)
- [28] 郭瑞萍, 肖发沂, 都振玉, 等. 枯草芽孢杆菌对肉鸡生产性能、屠宰性能、免疫性能和肌肉风味的影响[J]. 中国饲料, 2019, (17): 79-83.
- GUO R P, XIAO F Y, DU Z Y, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on the production performance, slaughter performance, immune performance and muscle flavor of broiler chickens [J]. *China Feed*, 2019, 17: 79-83. (in Chinese)
- [29] 赵满琦, 刘国华, 陈 星, 等. 菌酶协同发酵豆粕对肉鸡生长性能、屠宰性能、养分表观代谢率和肠道形态的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(12): 7742-7753.
- ZHAO M Q, LIU G H, CHEN X, et al. Effects of co-fermented soybean meal by bacteria and enzymes on growth performance, slaughter performance, nutrient apparent metabolic rates and intestingy of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(12): 7742-7753. (in Chinese)
- [30] MHLONGO G, MNISI C. Effect of seaweed (*Ecklonia maxima*) on apparent nutrient digestibility, growth performance, and physiological and meat quality parameters in Boschveld cockerels [J]. *Poult Sci*, 2023, 102(2): 102361.
- [31] 郑建婷, 冯国亮, 曹 亮, 等. 枯草芽孢杆菌和复合酶制剂对獭兔生长性能、养分表观消化率、屠宰性能、免疫器官指数及毛皮质量的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(6): 2808-2815.
- ZHENG J T, DENG G L, CAO L, et al. Effects of *Bacillus subtilis* and complex enzyme preparation on growth performance, nutrient apparent digestibilities, slaughter performance, immune organ indexes and fur quality of Rex rabbits [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(6): 2808-2815. (in Chinese)
- [32] SINGH S, SHARMA R, MALHOTRA S, et al. *Lactobacillus rhamnosus* NCDC17 ameliorates type-2 diabetes by improving gut function, oxidative stress and inflammation in high-fat-diet fed and streptozotocintreated rats [J]. *Benef Microbes*, 2017, 8(2): 243-255.
- [33] KONIECZKA P, NOWICKA K, MADAR M, et al.

- Effects of pea extrusion and enzyme and probiotic supplementation on performance, microbiota activity and biofilm formation in the broiler gastrointestinal tract[J]. *Br Poult Sci*, 2018, 59(6):654-662.
- [34] 张 燕. 枯草芽孢杆菌对肉鸡生产性能、血清代谢产物和肠道健康的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- ZHANG Y. Effects of *Bacillus subtilis* on the growth performance, serum metabolites and intestinal health in broiler chicken [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [35] 党国旗. 壳寡糖对仔猪生长性能、营养物质利用率及免疫能力的影响研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- DANG G Q. Effects of Chitosan oligosaccharide on growth performance, nutrient digestibility, and immunity of weaned piglets [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [36] 赵金艳, 权 凯, 张子军, 等. 黄淮肉羊肉用性能的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021, 42(5):59-64.
- ZHAO J Y, QUAN K, ZHANG Z J, et al. Mutton performance of Huang-huai sheep[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 42(5):59-64. (in Chinese)
- [37] 宋 涛. 日粮中不同水平壳寡糖对北京鸭生长性能、脂肪沉积以及肉品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- SONG T. The effects of Chitosan oligosaccharide of different levels on growth performance, lipid storage and meat quality of peking ducks [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [38] 孙建广, 张石蕊, 谯仕彦, 等. 发酵乳酸杆菌对生长肥育猪生长性能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2010, 22(1):132-138.
- SUN J G, ZHANG S R, QIAO S Y, et al. Effects of *Lactobacillus fermentum* on growth performance and meat quality in growing-finishing pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(1):132-138. (in Chinese)
- [39] 李 阳. 壳寡糖和干酪乳杆菌对肉鸡肉品质和脂肪代谢的影响及其作用机理 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- LI Y. Effects of Chitosan oligosaccharide and *Lactobacillus casei* on meat quality and lipid metabolism of broilers and its underlying mechanism [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [40] 魏琳琳, 兰瑞霞, 王语晨, 等. 壳寡糖对肉鸡生长性能、屠宰性能、胸肌肉品质及氧化稳定性的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(1):307-313.
- WEI L L, LAN R X, WANG Y C, et al. Effects of Chitosan oligosaccharide on growth performance, slaughter performance, breast muscle quality, and oxidative stability of broiler chickens [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2024, 60(1):307-313. (in Chinese)
- [41] MIR N, RAFIQ A, KUMAR F, et al. Determinants of broiler chicken meat quality and factors affecting them: a review[J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 54(10):2997-3009.
- [42] MOHAMMED A, ZAKI R, NEGM E, et al. Effects of dietary supplementation of a probiotic (*Bacillus subtilis*) on bone mass and meat quality of broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2021, 100(3):100906.
- [43] 刘 顺. 枯草芽孢杆菌 BS66 对黄羽肉鸡生产性能、肉品质、免疫和抗氧化功能及肠道健康的影响[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2024.
- LIU S. Effects of *Bacillus subtilis* BS66 on production performance, meat quality, immune function, antioxidant capacity and intestinal health of yellow-feathered broilers [D]. Foshan: Foshan University, 2024. (in Chinese)
- [44] 黄 攀, 陆 燕, 茆达干, 等. 日粮多不饱和脂肪酸对畜禽肉品质的影响[J]. 畜牧与兽医, 2008, 40(12):93-95.
- HUANG P, LU Y, MAO D G, et al. Effects of dietary polyunsaturated fatty acids on meat quality in livestock and poultry [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2008, 40(12):93-95. (in Chinese)
- [45] WANG R, CHEN J, GOONERATNE R, et al. Effects of varied molecular weight of chitosan oligosaccharides on growth performance, carcass trait, meat quality, and fat metabolism in indigenous yellow-feathered chickens[J]. *J Appl Poult Res*, 2022, 31(1):100221.
- [46] 陈静文. 不同分子质量壳寡糖对新广黄肉鸡脂质代谢及胴体品质的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021.
- CHEN J W. Effect of different molecular weight of chitooligosaccharides on lipid metabolism and carcass quality of Xinguanghuang chickens [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021. (in Chinese)
- [47] PRZYBYLSKI W, SALEK P, KOZŁOWSKA L,

- et al. Metabolomic analysis indicates that higher drip loss may be related to the production of methylglyoxal as a by-product of glycolysis[J]. *Poult Sci*, 2022, 101(2):101608.
- [48] 马云昊,王 颖,徐宝才. 宰后早期肌原纤维蛋白降解对肌肉纤维加热收缩及熟肉品质的影响[C]//中国食品科学技术学会第十九届年会论文摘要集: 2022:348-349.
MA Y H, WANG Y, XU B C. Effects of myofibrillar protein degradation in early postmortem on muscle fiber heating contraction and cooked meat quality [C]//Abstracts of the 19th Annual Meeting of CIFST:2022:348-349. (in Chinese)
- [49] HOSOTANI M, KAMETANI K, OHNO N, et al. The unique physiological features of the broiler pectoralis major muscle as suggested by the three-dimensional ultrastructural study of mitochondria in type IIb muscle fibers[J]. *J Vet Med Sci*, 2021, 83(11):1764-1771.
- [50] 马 顺,宋 阳,林晓艳,等. 包被丁酸钠对肉鸡生长性能、肉品质、血清生化指标及盲肠菌群结构的影响[J]. *动物营养学报*, 2025, 37(2):950-960.
MA S, SONG Y, LIN X Y, et al. Effects of coated sodium butyrate on growth performance, meat quality, serum biochemical indices and cecal microbial structure of broilers[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(2):950-960. (in Chinese)
- [51] 刘禹彤,马欣怡,王璐瑶,等. 富马酸和肉桂醛及其联合添加对817肉鸡生长性能、血清指标和肠道健康的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(10):6345-6357.
LIU Y T, MA X Y, WANG L Y, et al. Effects of fumaric acid and cinnamaldehyde and their combination on growth performance, serum indices and intestine health of 817 broilers[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(10):6345-6357. (in Chinese)
- [52] 李 俊. 壳寡糖对肉鸡生长性能、肠道免疫与屏障功能和肌肉品质的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2020.
LI J. Effect of Chitooligosaccharide on growth performance, intestinal immunity, barrier function and meat quality in broilers[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [53] 黄宇哲,吴前震,许腾龙,等. 多糖对炎症性疾病及肠道菌群调控作用的研究进展[J]. *中国药理学通报*, 2022, 38(11):1601-1606.
HUANG Z Y, WU Q Z, XU T L, et al. Advances in research of polysaccharides on inflammatory diseases and gut microbiota [J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2022, 38(11):1601-1606. (in Chinese)
- [54] MANCABELLI L, FERRARIO C, MILANI C, et al. Insights into the biodiversity of the gut microbiota of broiler chickens[J]. *Environ Microbiol*, 2016, 18(12): 4727-4738.
- [55] AHIR V, KORINGA P, BHATT V, et al. Metagenomic analysis of poultry gut microbes [J]. *Indian J Poult Sci*, 2010, 45(2):111-114.
- [56] 张 雪. 枯草芽孢杆菌对肉鸡免疫性能、抗氧化功能、肠道形态和微生物菌群的影响[D]. 晋中:山西农业大学, 2020.
ZHANG X. Effects of *Bacillus subtilis* on immunity, antioxidation and intestinal morphology and microbial diversity of broilers [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [57] 张义楠,闫 雪,赵 晨,等. 贝莱斯芽孢杆菌对金霉素作用下肉鸡生长性能、肠道菌群及其耐药基因的影响研究[J]. *饲料工业*, 2024, 45(2):56-65.
ZHANG Y N, YAN X, ZHAO C, et al. Study on the effects of *Bacillus velezensis* on growth performance, gut microbiota and antibiotic resistance genes of broilers under the action of chlortetracycline [J]. *Feed Industry*, 2024, 45(2):56-65. (in Chinese)
- [58] 杨 雪,高亚男,王加启,等. 短链脂肪酸的功能研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(13):408-417.
YANG X, GAO Y N, WANG J Q, et al. Research progress on the functions of short chain fatty acid [J]. *Food Science*, 2023, 44(13):408-417. (in Chinese)
- [59] 黄桥深,张永康,汪水平,等. 嗜黏蛋白阿克曼氏菌治疗疾病的潜力与作用机制研究进展[J]. *微生物学报*, 2023, 63(9):3360-3373.
HUANG Q S, ZHANG Y K, WANG S P, et al. Potential and mechanism of *Akkermansia muciniphila* in disease treatment [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(9):3360-3373. (in Chinese)

(编辑 范子娟)