

黄俊程, 陈宗菊, 艾克拜尔·热合曼, 等. 丁酸梭菌调控肠道菌群多样性缓解高盐诱导的肉鸡腹水综合征 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (2): 125-132.

HUANG J C, CHEN Z J, Ekbaier Rehemana, et al. *Clostridium butyricum* regulates intestinal flora diversity to alleviate high-salt-induced ascites syndrome in broilers [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (2): 125-132.

## 丁酸梭菌调控肠道菌群多样性缓解高盐诱导的肉鸡腹水综合征

黄俊程<sup>1</sup>, 陈宗菊<sup>1</sup>, 艾克拜尔·热合曼<sup>1,2</sup>, 王之超<sup>1</sup>, 张子婷<sup>1</sup>, 齐萌<sup>1,2\*</sup>, 冯昕炜<sup>1,2\*</sup>

(1. 塔里木大学动物科学与技术学院, 新疆 阿拉尔 843300;

2. 新疆生产建设兵团塔里木动物疫病诊断与防控工程实验室, 新疆 阿拉尔 843300)

**摘要:** 旨在研究日粮中添加不同浓度丁酸梭菌对高盐诱导黑羽肉鸡腹水综合征的调控作用。选取250羽1日龄健康黑羽肉鸡, 随机分为5组(每组5个重复, 每个重复10羽), T1组(基础饲料+蒸馏水)作为空白对照组, T2组(基础饲料+0.2% NaCl 饮水)为对照试验组, 处理组T3、T4、T5在T2组基础上分别添加125、250、500 mg/kg 丁酸梭菌粉剂, 试验周期35 d。试验期间每日记录各组肉鸡采食量, 并于第1天和第35天测定空腹体重, 计算平均日增重和胴体重。第35天试验结束后, 解剖采集免疫器官以计算其指数, 并收集盲肠内容物, 用于菌群组成与多样性分析。结果: 与T1和T2组相比, 各剂量丁酸梭菌组均能极显著提高35日龄肉鸡体重 ( $P < 0.01$ ), 并极显著降低料重比 ( $P < 0.01$ ), 其中T4组与T2组相比差异最为显著; 与T1和T2组相比, T4组能极显著提高法氏囊指数、胸腺指数以及脾脏指数 ( $P < 0.01$ ); 与T2组相比, T4组在门水平上均显著提高了35日龄盲肠中的拟杆菌门 (Bacteroides), 降低了厚壁菌门 (Firmicutes) 的相对丰度 ( $P < 0.05$ ), 厚壁菌门和拟杆菌门的比值极显著降低 ( $P < 0.01$ ); 与T2组相比, T4组在属水平上极显著提高了35日龄盲肠中的巴恩斯氏菌属 (*Barnesiella*) 的相对丰度 ( $P < 0.01$ )。结论: 在高盐饮水的条件下, 日粮添加250 mg/kg 浓度丁酸梭菌可通过调节肠道菌群结构和增强免疫功能, 显著改善黑羽肉鸡生长性能, 还可以明显降低黑羽肉鸡腹水综合征的发生率。

**关键词:** 丁酸梭菌; 生长性能; 肠道菌群; 腹水综合征; 肉鸡

中图分类号: S854

文献标志码: A

文章编号: 0529-5130(2026)02-0125-08

## *Clostridium butyricum* regulates intestinal flora diversity to alleviate high-salt-induced ascites syndrome in broilers

HUANG Juncheng<sup>1</sup>, CHEN Zongju<sup>1</sup>, Ekbaier Rehemana<sup>1,2</sup>, WANG Zhichao<sup>1</sup>, ZHANG Ziting<sup>1</sup>,  
QI Meng<sup>1,2\*</sup>, FENG Xinwei<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Animal Science and Technology, Tarim University, Alar 843300, China;

2. Tarim Animal Disease Diagnosis and Control Engineering Laboratory, Xinjiang Production and Construction Corps, Alar 843300, China)

**Abstract:** The aim of this study was to investigate the effects of different concentrations of *Clostridium butyricum* on high salt-induced ascites syndrome in black-feathered broilers. A total of 250 one-day-old healthy black-feathered broilers were randomly divided into 5 groups (5 replicates per group, 10 birds per replicate), with the T1 group (fed with basal diet + distilled water) as the blank control group, the T2 group (with basal diet + 0.2% NaCl drinking water) was the control test group, and the T3, T4 and T5 groups were fed with a diet supplemented with 125, 250 and 500 mg/kg *C. butyricum* powder, respectively, on the basis of the diet of the T2 group. The experiment lasted for 35 days, during which, the feed intake of the broilers in each group was recorded daily, and their fasting body weight was measured on the 1<sup>st</sup> and 35<sup>th</sup> days, and their average daily gain and carcass weight were measured. At the end of the 35d experiment, the immune organs of the broilers were dissected and collected to determine the indexes, and the cecal contents were collected for the analysis of flora composition and diversity. The experimental results were as follows: Compared with the T1 and T2 groups, all the *C. butyricum* treated groups significantly increased their final body weight ( $P < 0.01$ ) and significantly reduced their feed conversion ratio ( $P < 0.01$ ) at 35 days of age, with the most

收稿日期: 2025-04-18; 修回日期: 2025-12-16

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (32060785)

第一作者: 黄俊程, 男, 硕士研究生

\* 通信作者: 齐萌, 教授, 研究方向为人兽共患病病原生物学研究, E-mail: qimengdz@163.com; 冯昕炜, 教授, 主要从事家禽群发病防治研究, E-mail: fxwdky@126.com。

pronounced effects observed in the T4 group. Compared with the T1 and T2 group, the T4 group significantly improved their bursa of Fabricius index, thymus index, and spleen index ( $P < 0.01$ ). The T4 group significantly increased the relative abundance of Bacteroidetes ( $P < 0.05$ ) in their cecal microbiota at the phylum level, but significantly reduced the Firmicutes/Bacteroidetes ratio ( $P < 0.001$ ). At the genus level, the T4 group significantly enhanced the relative abundance of *Barnesiella* ( $P < 0.01$ ). These findings indicated that, under high-salt drinking water conditions, dietary supplementation with 250 mg/kg *C. butyricum* effectively improved growth performance and reduced the incidence of ascites syndrome in black-feathered broilers by modulating their gut microbiota composition and enhancing their immune function.

**Keywords:** *Clostridium butyricum*; growth performance; intestinal flora; ascites syndrome

肉鸡腹水综合征 (ascites syndrome, AS) 是影响肉鸡生长代谢的常见疾病之一, 给肉鸡养殖业的健康发展造成了巨大经济损失<sup>[1]</sup>。研究表明, 摄入过量食盐、饲料营养不均衡、管理不当应激、缺氧环境、低温条件、品种遗传和多种疾病等因素均与 AS 发病密切相关<sup>[2]</sup>。近年来, 随着养殖模式的改变, AS 的发病率呈上升趋势, 药物治疗的作用有限, 且易造成药物残留, 对食品卫生安全构成潜在的威胁。

益生菌可维持正常胃肠道菌群活性、刺激宿主免疫系统、抵抗病原菌增殖, 增强胃肠道黏膜的完整性, 提高机体对营养物质的消化和吸收能力, 促进机体的生长发育<sup>[3]</sup>。丁酸梭菌 (*Clostridium butyricum*) 是常用的革兰阳性厌氧菌, 主要通过代谢膳食纤维生成乙酸、丁酸和乳酸等短链脂肪酸 (short chain fatty acid, SCFA), 可为肠上皮细胞提供主要能量来源、增强肠黏膜屏障完整性, 通过降低肠道 pH 值调控菌群微生态平衡<sup>[4]</sup>。研究发现, 丁酸梭菌及其代谢产物的多项调控作用对人类肠道获得性感染、黏膜损伤及炎症性肠病、神经退行性疾病、代谢疾病和结直肠癌等多种疾病具有潜在保护或改善作用<sup>[5]</sup>。

徐晨希<sup>[6]</sup>研究发现, 在肉鸡饲料中添加壳寡糖或丁酸梭菌均可促进肉仔鸡生长发育, 改善肠道环境, 但两者复合使用的效果与单独使用的效果无显著差异。李洪涛等<sup>[7]</sup>研究发现, 丁酸梭菌可提高肉鸡的生长性能、屠宰性能、免疫器官指数等, 具有良好的替代抗生素效果。基于本实验室前期研究证实, 长期摄入 NaCl 浓度  $\geq 1$  g/L 的饮水会诱导 AS 的发生, 本研究旨在建立高盐诱导 AS 的模型基础上, 系统探讨日粮中添加丁酸梭菌对 AS 的作用效果, 为其临床应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验动物、药品及主要试剂

丁酸梭菌粉 (20230423), 菌数为  $10^{11}$  CFU/g, 购自山东诺杰生物科技有限公司; NaCl 为分析纯, 购自天津市永大化学试剂有限公司 (YD20220501); 试验动物为 1 日龄黑羽肉鸡 (天露黑鸡 6 号公鸡苗), 购自阿克苏市某孵化场。

### 1.2 试验设计

试验选取 250 只 1 日龄健康的黑羽肉鸡, 正常饲养 7 d。肉鸡 8 日龄时, 随机分为 5 组, 每组 5 个重复, 每个重复 10 羽。空白对照组 (T1 组) 肉鸡饲喂基础日粮和蒸馏水, 试验对照组 (T2 组) 肉鸡饲喂基础日粮并自由饮用含 0.2% NaCl 溶液, T3、T4、T5 试验组分别在基础日粮中梯度添加丁酸梭菌粉剂 125、250、500 mg/kg, 同时维持 0.2% NaCl 饮水方案。

### 1.3 基础饲粮与饲养管理

采用新疆某饲料有限公司生产的肉鸡饲料作为基础日粮, 其原料组成及营养物质详见表 1。试验在塔里木大学动物科学与技术学院动物实验站进行, 在开展试验前, 先统一饲喂肉鸡 7 d, 后进行分组试验, 每个试验组饲养于同一笼中。分组后的肉鸡饲喂 35 d, 鸡群自由饮水和采食, 详细记录饲料消耗量和肉鸡临床症状; 每日清洗饮水器和粪便, 鸡舍保持 24 h 光照; 消毒和肉鸡免疫程序均按常规标准执行。

### 1.4 雏鸡生长性能测定

在试验第 35 天时, 肉鸡禁食 12 h 后, 各试验重复组随机选取 10 羽肉鸡剖杀, 测定各试验组肉鸡体重, 计算胴体重、平均日增重、料重比和平均日采食量。

### 1.5 免疫器官相对重量的测定

在肉鸡 35 日龄屠宰前, 记录其体重。解剖获取肉鸡胸腺、脾脏和法氏囊后, 使用滤纸吸干血水进行称重, 计算其免疫器官指数。免疫器官指数 = 免疫器官重 (g) / 宰前体重 (kg)。

### 1.6 AS 的诊断

记录 1~35 日龄确诊的鸡只中 AS 的病例数。参考临床诊断方法进行鉴别诊断, 其典型临床症状包括精神沉郁、羽毛蓬乱、采食饮水减少、发育迟缓及鸡冠肉髯发绀, 特征性表现为腹围显著增大伴皮肤发亮或紫绀。病理剖检可见腹腔积聚 100~500 mL 淡黄色至淡红黄色半透明腹水, 肝脏瘀血肿大并覆纤维素膜, 心脏呈现右心室肥大扩张伴心包积液, 同时伴有肺、肾、脾等多器官瘀血肿大及皮下水肿。

表1 试验基础饲料配方及营养水平 (干物质基础)

项目		含量	
		8~21日龄	21~35日龄
原料/%	玉米	52	54.3
	豆粕	32	32
	菜籽粕	5	5
	麸皮	2.2	2.1
	葵粕	2.5	2.1
	氨基酸	1.5	1
	磷酸氢钙	0.8	0.7
	石粉	1.7	1.7
	氯化钠	0.25	0.25
	L-赖氨酸	0.65	0.62
	DL-蛋氨酸	0.25	0.23
	L-苏氨酸	0.15	0.1
	预混料 <sup>①</sup>	1	1
	营养成分	代谢能/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	12.68
粗蛋白质/%		19.5	18.5
赖氨酸/%		1.42	1.37
蛋氨酸/%		0.55	0.51
苏氨酸/%		0.87	0.81
色氨酸/%		0.22	0.19
钙/%		0.95	1.01
有效磷/%		0.51	0.42
总磷/%		0.49	0.43

注：①预混料为每千克饲料提供：Mn 100 mg, I 0.6 mg, Fe 64.5 mg, Zn 84 mg, Cu 8.4 mg, Se 0.278 mg, VA 8 000 IU, VD<sub>3</sub> 1 000 IU, VE 20 IU, VK 30.40 mg, VB<sub>1</sub> 2.00 mg, VB<sub>2</sub> 8.00 mg, VB<sub>6</sub> 4.50 mg, VB<sub>12</sub> 10.00 μg, 烟酸 34.00 mg, 泛酸钙 10.00 mg, 叶酸 0.45 mg, 生物素 0.16 mg。

### 1.7 肉鸡盲肠肠道菌群测定

在35日龄肉鸡屠宰时,从每个处理组的每个重复中随机选取3只体重相近的肉鸡,解剖取出盲肠,无菌收集盲肠内容物置于2 mL离心管中,立即于

-80℃冻存。随后,将样本送至上海派森诺生物科技股份有限公司进行肠道菌群的高通量测序。根据测序结果,开展物种多样性及菌群组成分析,差异物种通过宏基因组测序方法进行样本间两两比较筛选,关键生物标志物则基于随机森林算法进一步挖<sup>[8]</sup>。本研究选用了多项α多样性指数以评估微生物群落特征,具体包括:反映群落丰富度的Chao1指数,反映群落多样性的Shannon指数和Simpson指数,以及反映系统发育多样性的Faith's PD指数和测序深度指标的Good's coverage指数。在门和属水平上比较菌群组成,分组样本以平均值计算,相对丰度小于1%的合并为其他(others)<sup>[9]</sup>。为比较各组盲肠微生物群落结构的整体差异,采用β多样性分析,基于Bray-Curtis距离算法构建距离矩阵,并利用非度量多维尺度分析(NMDS)进行降维可视化。

### 1.8 数据统计与分析

测量数据使用Excel进行整理后,采用SPSS 26.0和GraphPad Prism 9.0软件进行统计分析作图。肉鸡生长性能指标和免疫器官指数数据采用单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用Duncan法。结果以“平均值±标准差”表示。显著性水平设定为, $P<0.05$ 表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 丁酸梭菌对肉鸡生长性能的影响

由表2可知,与T2组肉鸡相比,丁酸梭菌各组黑羽肉鸡在35日龄时的体重极显著提高( $P<0.01$ );与T2组肉鸡相比,250、500 mg/kg丁酸梭菌组能极显著提高35日龄时肉鸡的胴体重( $P<0.01$ );与T2组肉鸡相比,丁酸梭菌各组能极显著提高35日龄平均日增重( $P<0.01$ );与T2组肉鸡相比,丁酸梭菌各组能显著降低35日龄肉鸡料重比( $P<0.05$ )。250 mg/kg丁酸梭菌组体重、胴体重和平均日增重在各组之间最高,且料重比最低。

表2 日粮添加丁酸梭菌对高盐饮水黑羽肉鸡生长性能的影响

指标	T1组	T2组	T3组	T4组	T5组
体重/g	731.87±9.02 <sup>Aa</sup>	764.53±10.33 <sup>Bb</sup>	902.43±6.09 <sup>Dd</sup>	924.00±8.89 <sup>Ee</sup>	827.20±18.59 <sup>Cc</sup>
胴体重/g	373.40±39.57 <sup>Aa</sup>	382.17±4.87 <sup>Aa</sup>	406.37±19.26 <sup>Aa</sup>	492.00±17.44 <sup>Bb</sup>	452.97±32.17 <sup>Bb</sup>
平均日增重/g	25.48±1.15 <sup>Aa</sup>	23.14±0.54 <sup>Aa</sup>	31.78±1.48 <sup>Bc</sup>	34.39±0.87 <sup>Cd</sup>	29.00±3.31 <sup>Bb</sup>
料重比	2.02±0.20 <sup>c</sup>	1.84±0.04 <sup>b</sup>	1.68±0.01 <sup>a</sup>	1.58±0.03 <sup>a</sup>	1.65±0.09 <sup>a</sup>

注:同行数据肩标不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。下同。

### 2.2 丁酸梭菌对肉鸡免疫器官指数的影响

由表3可知,在试验第35天时,与T2组相比,

添加250 mg/kg丁酸梭菌极显著提高了肉仔鸡的法氏囊指数( $P<0.01$ );各浓度丁酸梭菌添加组肉仔鸡的

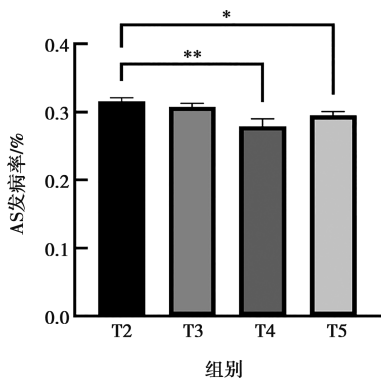
脾脏指数均显著高于 T2 组 ( $P < 0.05$ )；250 mg/kg 丁酸梭菌添加组肉仔鸡的胸腺指数极显著高于其他组 ( $P < 0.01$ )。

表 3 日粮添加丁酸梭菌对试验 35 日龄肉鸡免疫器官指数的影响

指数	T1 组	T2 组	T3 组	T4 组	T5 组
法氏囊	1.64±0.42 <sup>Aa</sup>	1.34±0.25 <sup>Aa</sup>	1.84±0.56 <sup>Aa</sup>	2.78±0.64 <sup>Bb</sup>	1.33±0.31 <sup>Aa</sup>
脾脏	1.22±0.09 <sup>Ab</sup>	0.73±0.18 <sup>Aa</sup>	1.28±0.15 <sup>Ab</sup>	2.18±0.38 <sup>Bd</sup>	1.78±0.19 <sup>Ac</sup>
胸腺	4.06±0.37 <sup>Aa</sup>	3.39±0.15 <sup>Aa</sup>	4.09±0.21 <sup>Aa</sup>	4.65±1.16 <sup>Bb</sup>	4.19±0.23 <sup>Aa</sup>

### 2.3 丁酸梭菌对 AS 发病率的影响

如图 1 所示，与对照组相比，日粮中添加丁酸梭菌显著降低了 AS 的发病率 ( $P < 0.05$ )。不同添加剂量对肉鸡死亡率的影响存在差异：125 mg/kg 丁酸梭菌处理组的 AS 发病率与对照组相比无显著差异 ( $P > 0.05$ )，而 250 mg/kg 处理组可极显著降低 AS 发病率 ( $P < 0.01$ )，500 mg/kg 处理组显著降低 AS 发病率 ( $P < 0.05$ )。



\* 表示  $P < 0.05$ ，\*\* 表示  $P < 0.01$ 。下同。

图 1 日粮添加丁酸梭菌对肉鸡 AS 发病率的影响

### 2.4 250 mg/kg 丁酸梭菌对黑羽肉鸡盲肠微生物群落结构的影响

#### 2.4.1 各组肉鸡盲肠微生物 OTU 数据的比较分析

如图 2 所示，T1 组特有的 OTUs 有 4 090 个，T2 组特有的 OTUs 有 4 064 个，T4 组特有的 OTUs 有 3 919 个。

#### 2.4.2 肉鸡盲肠内容物的 $\alpha$ 多样性分析

由表 4 可知，各组样本的 Good's\_coverage 指数均接近 1，表明测序深度足以覆盖样本中绝大部分物种。分析结果显示，各组 Chao1、Shannon、Simpson、Faith's PD 和 Good's coverage 指数均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。与 T1 组相比，T4 组的 Faith's PD 指数高于 T1 和 T2 组 ( $P > 0.05$ )。

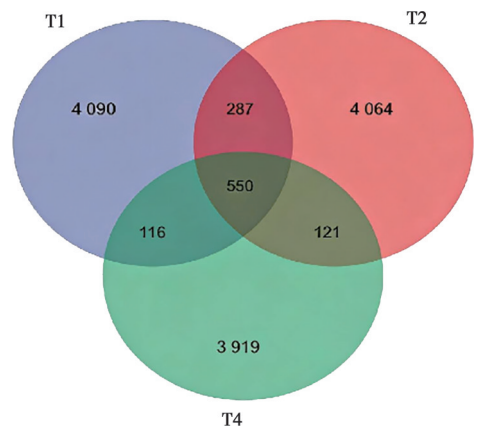


图 2 日粮添加丁酸梭菌肉鸡盲肠微生物分布韦恩图

表 4 日粮添加 250 mg/kg 丁酸梭菌对黑羽肉鸡盲肠微生物  $\alpha$  多样性的影响

指数	T1 组	T2 组	T4 组
Chao1	2 042.62±258.79	2 048.92±170.70	1 845.39±55.23
Shannon	7.61±0.38	7.83±0.30	7.51±0.23
Simpson	0.98±0.004	0.98±0.01	0.97±0.005
Faith'Pd	112.41±9.55	113.15±3.84	120.35±6.93
Good's coverage	0.99	0.99	0.99

#### 2.4.3 肉鸡盲肠内容物的 $\beta$ 多样性分析

NMDS 分析直观地展示了样本之间的总体相似与差异性。本试验结果显示，应力 (Stress) 值为 0.156 ( $< 1.0$ )，表明样本间存在显著差异。如图 3 所示，各组自聚为一类，各样本间保持相对距离，且存在一定差异，聚类性并不明显。相比之下，T1 组与 T2 组的样本距离较近，聚类更明显。

### 2.5 250 mg/kg 丁酸梭菌对黑羽肉鸡盲肠菌群结构的影响

#### 2.5.1 盲肠微生物菌群中物种分布情况

根据物种测序结果，样本在门水平上的注释信息如图 4A 所示，主要包括以下门类：拟杆菌门 (Bacteroidota)、厚壁菌门 (Firmicutes)、疣微菌门 (Verrucomicrobia)、变形菌门 (Proteobacteria)、互养

菌门 (Synergistota)、热脱流感菌门 (Desulfobacteria)、放线菌门 (Actinobacteriota)、脱铁杆菌门 (Deferribacterota)、弯曲菌门 (Campylobacterales)、蓝藻菌门 (Cyanobacteria) 以及其他。

如图 4B 所示, 与 T2 组相比, T1 对照组的拟杆菌门丰度显著升高 ( $P<0.05$ ), 而 T4 组的拟杆菌门丰度极显著升高 ( $P<0.01$ )。图 4C 显示, 与 T2 组相比, T1 组和 T4 组的厚壁菌门丰度均极显著降低。此外, 图 4D 表明, 与 T2 组相比, T4 组的厚壁菌门与拟杆菌门的比值极显著降低 ( $P<0.001$ )。

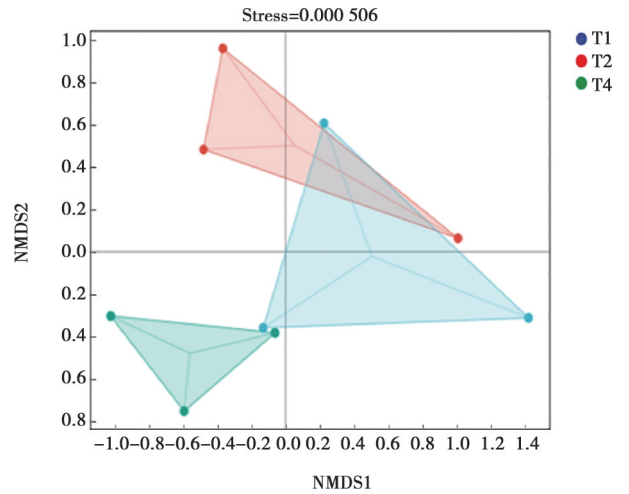
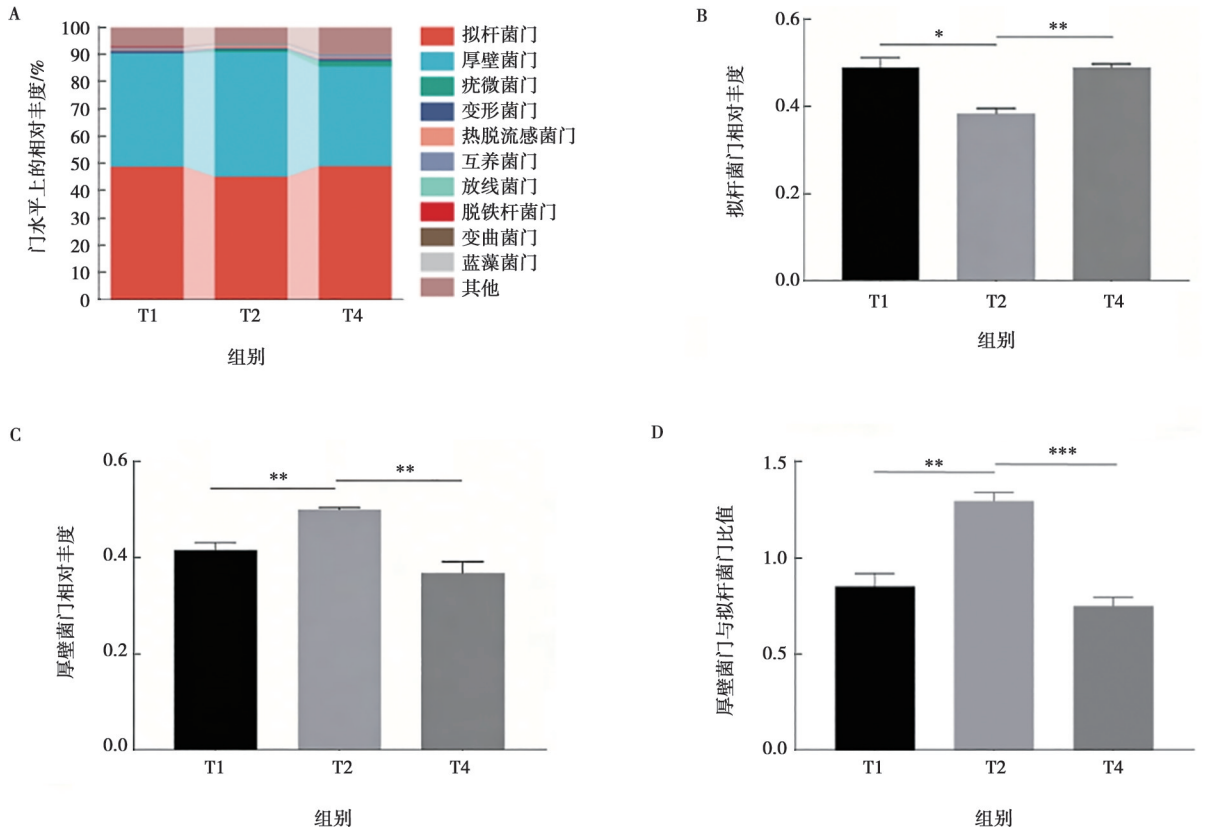


图 3 日粮添加丁酸梭菌肉鸡盲肠属水平 NMDS 分析

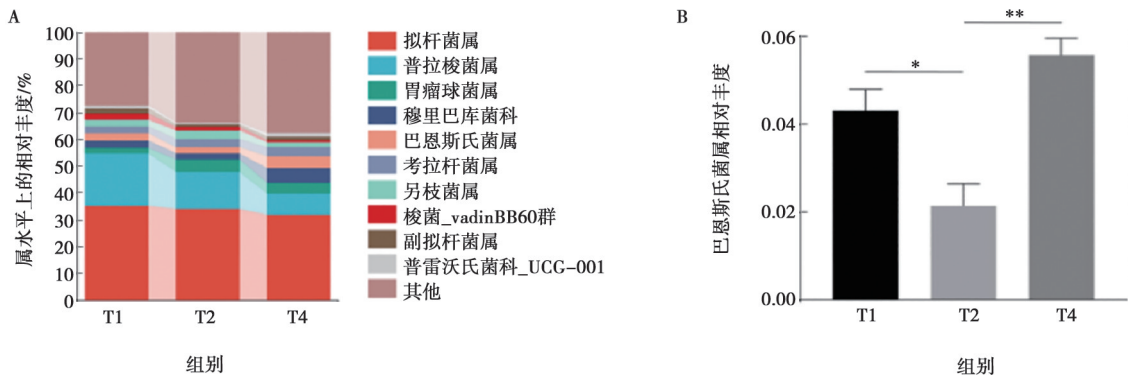


A. 门水平相对丰度; B. 拟杆菌门相对丰度; C. 厚壁菌门相对丰度; D. 厚壁菌门与拟杆菌门比值。\*\*\*表示  $P<0.001$ , 下同。

图 4 日粮添加 250 mg/kg 丁酸梭菌对黑羽肉鸡盲肠微生物门水平群落结构的影响

根据属相对丰度表, 样本属水平的注释信息如图 5A 所示, 主要包括拟杆菌属 (*Bacteroides*)、普拉梭菌属 (*Faecalibacterium*)、胃瘤球菌属 (*Ruminococcus\_torques\_group*)、考拉杆菌属 (*Phascolarctobacterium*)、副拟杆菌属 (*Parabacteroides*)、另枝菌属 (*Alistipes*)、巴恩斯氏菌属 (*Barnesiella*)、穆里巴库

菌科 (*Muribaculaceae*)、梭菌\_vadinBB60群 (*Clostridia\_vadinBB60\_group*)、副拟杆菌属 (*Parabacteroides*)、普雷沃氏菌科 (*Prevotellaceae\_UCG-001*) 等。在属水平上, 如图 5B 所示, 与 T2 组相比, T1 组的巴恩斯氏属差异显著 ( $P<0.05$ ), 而 T4 组差异极显著 ( $P<0.01$ )。



A. 属水平相对丰度; B. 巴恩斯氏菌属水平相对丰度。

图5 日粮添加 250 mg/kg 的丁酸梭菌对肉鸡盲肠微生物属水平群落结构的影响

### 3 讨论

研究发现,添加丁酸梭菌对提高畜禽生长性能具有良好促进作用<sup>[10]</sup>。这一发现与商品肉鸡的研究结果一致,添加丁酸梭菌制剂能够提高商品肉鸡的阶段体重和平均日增重,同时降低平均日采食量和料重比<sup>[11]</sup>。蒋玲艳等<sup>[12]</sup>以麻黄肉鸡为对象,在基础饲料中添加高剂量( $5 \times 10^5$  CFU/g)的丁酸梭菌制剂,结果发现,丁酸梭菌组的生长性能显著高于对照组,料重比也显著低于对照组。李怀宇<sup>[13]</sup>的研究表明,在三黄肉鸡基础饲料中添加丁酸梭菌制剂可显著提高末体重和平均日增重,但随添加量的增加,这些指标呈现下降趋势,同时料重比也有降低。本试验结果与上述研究发现一致,饲料中添加丁酸梭菌显著提高了肉鸡末体重和平均日增重,并降低其料重比。本研究发现,35日龄时,250 mg/kg 丁酸梭菌组肉鸡体重、胴体重和平均日增重均极显著高于 500 mg/kg 和 125 mg/kg 丁酸梭菌组,而3组之间的料重比差异不显著。这一现象的原因可能在于肉鸡幼龄期肠道菌群发育尚未完善,外源添加丁酸梭菌能够迅速促进肠道菌群的建立和维持环境的稳态,从而促进肉鸡的生长发育。然而随着丁酸梭菌添加量的增加,生长性能呈现下降的趋势,推测可能是由于丁酸梭菌的过量添加使代谢产物和分泌物过多,导致肉鸡肠道菌群和微生态环境的紊乱,进而影响了其生产性能<sup>[14]</sup>。此外,大量丁酸梭菌也会消耗肠道内的营养物质,进而影响肉鸡的生长性能<sup>[15]</sup>。

中枢和外周免疫器官的发育状态及机能强弱,直接决定了禽类全身的免疫水平<sup>[16]</sup>。何菊等<sup>[17]</sup>研究表明,在肉鸡日粮中添加丁酸梭菌制剂能够促进肉鸡免疫器官的生长发育,有效维持免疫器官重量,提高肉鸡免疫系统机能。李可等<sup>[18]</sup>研究表明,在基础饲料

中添加丁酸梭菌显著提高了AA肉仔鸡公鸡和母鸡免疫器官指数,丁酸梭菌刺激了机体免疫器官的发育,提高了机体的免疫力。本试验中,日粮添加丁酸梭菌可极显著提高黑羽肉鸡35日龄的脾脏、胸腺和法氏囊等免疫器官指数,这与上述研究结果基本一致,表明丁酸梭菌对改善机体免疫、提高免疫力有显著作用。大量试验研究表明,丁酸梭菌能够激活动物机体的免疫系统,其产物丁酸能刺激肠道黏膜免疫活性,并对肠道微生态的调节起到一定程度的促进作用<sup>[19]</sup>。

作为一种正常的肠道微生物,丁酸梭菌通过进食或服用后可维持或恢复肠道优势菌群,从而促进微生态平衡。作为一种益生菌,丁酸梭菌具有促进有益菌生长繁殖、抑制有害菌的功能,可预防或纠正肠道菌群失调。在家禽中,肠道菌群发挥着重要的作用,其中盲肠因其高度多样化的微生物群而最受关注<sup>[20]</sup>。家禽盲肠中含有大量微生物,这些微生物在维持家禽肠道微生态稳定和促进营养消化吸收方面起着至关重要的作用<sup>[21]</sup>。丁酸梭菌通过竞争、排斥、替代和改变肠道微环境,有效调节肠道菌群平衡,促进双歧杆菌、乳杆菌、巴恩斯氏菌等有益菌的增殖;同时,它能抑制致病性大肠杆菌、葡萄球菌等有害菌的生长,从而纠正肠道菌群失衡,改善微生态环境。

巴恩斯氏菌属隶属于拟杆菌门,其可通过调节肠道免疫稳态、抑制过度炎症反应及增强宿主对病原体的防御能力,在维持肠道健康中发挥关键作用<sup>[22]</sup>。近年有研究表明,炎症性肠病(IBD)患者肠道内巴恩斯氏菌的丰度显著低于健康人群,提示其可能参与IBD的病理调控<sup>[23]</sup>。此外,莫秋芬等<sup>[24]</sup>通过研究发现,巴恩斯氏菌的相对丰度与宿主体重呈显著正相关性,暗示其可能通过代谢途径影响能量平衡。上述研究结果与本试验结论高度吻合,即丁酸梭菌可能通过分泌丁酸、短链脂肪酸(SCFA)等代谢产物改善肠

道微环境,从而间接调控巴恩斯氏菌的定植与增殖。

本研究基于 16S rRNA 基因测序的组间比较发现,250 mg/kg 丁酸梭菌处理组引发了菌群组成的特异性改变:传统  $\alpha$  多样性指数 (Chao1, Shannon, Simpson) 未见显著波动,而表征进化史涵盖度的系统发育多样性指数 (Faith's PD) 则显著增加,提示菌群结构的重塑发生可能在系统发育层面。进一步分析表明,丁酸梭菌可能通过生态位竞争或代谢产物的选择性抑制作用,导致群落中低丰度菌属的减少和优势菌群的更替,进而降低物种均匀度。与此同时,具有远缘进化关系的菌株在筛选压力下形成优势定植,最终构建出系统发育距离更离散的微生态结构。这种菌群结构特征的改变可能与其调节肠道微生态平衡的益生机制密切相关。它不仅能通过营养剥夺抑制条件致病菌生长,还可以通过调节丁酸代谢通路来优化肠道微环境,并刺激宿主分泌防御素以增强生物屏障功能,以此缓解全身性炎症反应,减少心肺负担<sup>[25]</sup>。

AS 的发生与多种因素相关,包括缺氧环境、高能量饲料、遗传易感性以及饲养密度过大导致的室内 CO<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 浓度升高等<sup>[26]</sup>。其核心发病机制在于缺氧诱发的肺动脉高压 (PH),进而引发右心衰竭并最终导致腹腔积液<sup>[27]</sup>。值得注意的是,丁酸梭菌的代谢产物丁酸盐在 PH 调控中具有重要作用。Kim 等<sup>[28]</sup>研究发现,PH 宿主的肠道微生态普遍存在菌群失调现象,并伴随丁酸盐、丙酸盐等有益代谢物的减少。Karoor 等<sup>[29]</sup>进一步证实,外源性补充丁酸盐可以有效缓解 PH 相关的血管重塑和炎症反应。Clarke 等<sup>[30]</sup>研究表明,丁酸梭菌能分泌细菌素等抗菌物质,直接拮抗有害菌的生长,Cananirb 等<sup>[31]</sup>研究发现,丁酸梭菌产生的 SCFA 可以降低肠道 pH 值,抑制病原菌的黏附与繁殖。这些机制共同改善了肠道微生态平衡,增强营养吸收效率,从而降低代谢性缺氧风险,对预防高能量饲料和缺氧诱发的 AS 具有潜在作用。本研究结果表明,日粮中添加 250 mg/kg 丁酸梭菌可显著降低 AS 的发病率。

综上,在高盐饮水引发 AS 的情况下,饲料中补充 250 mg/kg 丁酸梭菌可显著改善黑羽肉鸡的生产性能并提升其免疫力,并且降低其 AS 的发病率。此外,还能通过调控盲肠微生物群落的结构与多样性,建立更优的肠道微生态平衡。本试验条件下,250 mg/kg 丁酸梭菌为最适宜添加量。

## 参考文献:

[1] CHENG S, LIU X, LIU P, et al. Dysregulated expression of mRNA and SNP in pulmonary artery remodeling in ascites syndrome

in broilers [J]. *Poult Sci*, 2021, 100 (3): 100877.

[2] BAGHBANZADEH A, DECUYPERE E. Ascites syndrome in broilers: physiological and nutritional perspectives [J]. *Avian Pathol*, 2008, 37 (2): 117-126.

[3] PEREIRA R, BORTOLUZZI C, DURRER A, et al. Performance and intestinal microbiota of chickens receiving probiotic in the feed and submitted to antibiotic therapy [J]. *J Anim Physiol Anim Nutr*, 2019, 103 (1): 72-86.

[4] 黄秋连,王立超,周昕,等.丁酸梭菌的来源、功能及其在畜禽生产中的应用 [J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2021, 33 (5): 53-58.

[5] STOEVMAM K, GARCIA-SO J, JUSTICE N, et al. Butyrate-producing human gut symbiont, *Clostridium butyricum*, and its role in health and disease [J]. *Gut Microbes*, 2021, 13 (1): 1907272.

[6] 徐晨希. 饲料添加壳寡糖、丁酸梭菌对肉仔鸡生长性能、肠道组织形态及盲肠微生物区系的影响 [D]. 扬州:扬州大学, 2019.

[7] 李洪涛,李爱军,庄佳荣,等.丁酸梭菌对商品肉鸡生长性能、屠宰性能、免疫器官指数和经济效益的影响 [J]. *饲料工业*, 2023, 44 (15): 19-24.

[8] 党文庆,何敏,上官明军,等.饲料复合添加丁酸梭菌和葡萄糖氧化酶对生长肉兔生长性能、屠宰性能、免疫和抗氧化功能以及盲肠微生物区系的影响 [J]. *动物营养学报*, 2024, 36 (1): 514-527.

[9] 李莹,张庆华,钟丽娟,等.丁酸梭菌对白羽肉鸡生长性能、免疫功能和肠道健康的影响 [J]. *动物营养学报*, 2023, 35 (8): 5023-5035.

[10] 李爱军. 丁酸梭菌对肉鸡生物学利用率影响的研究 [D]. 昆明:云南农业大学, 2023.

[11] 赵强,张伟,付大波,等.丁酸梭菌对肉鸡生长性能、血液指标、屠宰性能的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55 (11): 138-142.

[12] 蒋玲艳,张在,于乐,等.丁酸梭菌对肉鸡生长性能和体液免疫应答能力的影响 [J]. *中国饲料*, 2023 (2): 55-59.

[13] 李怀宇. 丁酸梭菌对肉鸡生长性能、屠体品质的影响及其机理研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2021.

[14] 吴敏燕,侯敏,崔卫东,等.丁酸梭菌与嗜酸乳杆菌组合对肉鸡生产性能、免疫功能、抗氧化能力和肉品质的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2025, 61 (4): 300-307.

[15] 张磊,李佳,张涛,等.微生态制剂对肉仔鸡生产性能和免疫功能的影响 [J]. *北京农学院学报*, 2008, 23 (4): 41-45.

[16] 林秋燕. 家禽免疫系统与免疫失败原因分析 [J]. *养禽与禽病防治*, 2020 (10): 27-32.

[17] 何菊,胡迪,郭云清,等.丁酸梭菌 CB1 对肉鸡免疫器官指数、黏膜 SIgA 抗体和血清生化指标的影响 [J]. *中国兽医学报*, 2018, 38 (5): 998-1002.

[18] 李可,罗建杰,孟昆,等.益生菌对肉仔鸡生产性能、胴体性状、免疫功能和肉品质的影响 [J]. *动物营养学报*, 2015, 27 (9): 2903-2910.

[19] 张晓阳,卢忆,马艳莉,等.丁酸梭菌生理功能及应用研究进展 [J]. *中国食物与营养*, 2012, 18 (12): 31-35.

[20] WANG K, CHEN G, CAO G, et al. Effects of *Clostridium butyricum* and *Enterococcus faecalis* on growth performance, intestinal structure, and inflammation in lipopolysaccharide - challenged weaned piglets [J]. *J Anim Sci*, 2019, 97 (10): 4140-4151.

- [21] 马逸轩, 王茜, 张兰, 等. 日粮添加精油对感染艾美尔球虫肉鸡肠道形态、炎症水平和肠道菌群的影响 [J]. 西南民族大学学报 (自然科学版), 2024, 50 (5): 492-501.
- [22] 薛澳徽, 热依沙·帕孜力江, 陈文婷, 等. 巨单胞菌属和巴恩斯氏菌属与疾病相关性研究 [J]. 医学信息, 2023, 36 (1): 169-172.
- [23] 肖亮. 肠结核患者肠道菌群的特点 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [24] 莫秋芬, 邓伶俐, 李杨, 等. 月桂酸单甘油酯对小鼠肠道菌群调节作用的时间依赖效应 [J]. 中国食品学报, 2021, 21 (5): 96-107.
- [25] 刘雅婷, 郑梦莉, 阳治康, 等. 饲料中添加丁酸梭菌和丁酸钠对蛋鸡生产性能、蛋品质及肠道健康的影响 [J]. 动物营养学报, 2024, 36 (8): 4957-4970.
- [26] 刘国信. 肉鸡腹水综合征的综合防治 [J]. 养禽与禽病防治, 2019 (5): 43-46.
- [27] 朱忠亮. 浅析肉鸡腹水综合征 [J]. 畜禽业, 2018, 29 (3): 77-78.
- [28] KIM S, RIGATTO K, GAZZANA M B, et al. Altered gut microbiome profile in patients with pulmonary arterial hypertension [J]. Hypertension, 2020, 75 (4): 1063-1071.
- [29] KAROOR V, STRASSHEIM D, SULLIVAN T, et al. The short-chain fatty acid butyrate attenuates pulmonary vascular remodeling and inflammation in hypoxia-induced pulmonary hypertension [J]. Int J Mol Sci, 2021, 22 (18): 9916.
- [30] CLARKE D J, MORRISJ G. Butyricin 7423: a bacteriocin produced by *Clostridium butyricum* NCIB7423 [J]. J Gen Microbiol, 1976, 95 (1): 67-77.
- [31] CANANIR B, DI COSTANZO M, LEONE L, et al. Potential beneficial effects of butyrate in intestinal and extraintestinal diseases [J]. World J Gastroenterol, 2011, 17 (12): 1519-1528.